基于能量吸收法的 U 型纸质缓冲材料性能模拟分析

刘滨¹, 苗红涛², 张岩²

(1.南京工业职业技术学院,南京 210023; 2.河南牧业经济学院,郑州 450046)

摘要:目的 研究采用 U 型瓦楞纸板进行缓冲包装设计的量化方法。方法 通过建立不同相关密度单层 U 型瓦楞纸板有限元模型,得到不同压缩速度下瓦楞纸板的应力-应变数据和单位体积吸收能量-应力数据,进行数据拟合得到相关密度方程和应变率方程。结果 随着相关密度的增加,瓦楞纸板的最大许用应力 也在不断增加;从单位体积吸收能量-应力曲线上看,不同相关密度瓦楞纸板的最大许用应力包迹线呈 线性关系;拟合的应变率方程和相关密度方程经验证可以方便高效地进行缓冲包装设计。结论 拟合的 应变率方程和相关密度方程使用方便、快捷、高效,减少了查表法带来的误差,在实际生产中具有一定 意义。

关键词:能量吸收法; 瓦楞纸板; 相关密度; 应变率; 缓冲材料 中图分类号: TS206.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)21-0058-05 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.012

Performance Simulation Analysis of U Paper Cushioning Material Based on Energy Absorption Method

*LIU Bin*¹, *MIAO Hong-tao*², *ZHANG Yan*² (1.Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210023, China; 2.Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: The paper aims to research quantification method of using U corrugated board to design the cushioning package. By establishing finite element models of U corrugated boards with different relative density, the stress-strain data and energy volume stress data of corrugated boards at different compression speeds were obtained. The density equation and strain rate equation were obtained by fitting data. With the increase of density, the corrugated board board of different density was linear; the fitting equation of strain rate and relative density equation had been proved to be convenient for cushioning packaging design efficiently. The fitted strain rate equation and correlation density equation are convenient, fast and efficient. It reduces the error caused by look-up table method, and has certain significances in actual production.

KEY WORDS: energy absorption method; corrugated carton; correlation density; strain rate; cushioning material

瓦楞纸板是一种优良的包装材料,具有质轻耐 用、强度高、尺寸稳定、力学性能好等优点,大量应 用于商品的储存及运输包装中。针对瓦楞纸板的研究 中,高德对瓦楞纸板的缓冲性能进行了建模,虽然建 立了应力与应变以及跌落次数等的数学函数关系,但 只是使缓冲结构的多自由度缓冲包装设计的数学计 算成为可能^[1];黄蜜等利用万能试验机得到了瓦楞纸 板静态应力-应变曲线,但只分析其具有的非单调 性^[2];卢富德等得到 C 瓦楞纸板静态、动态应力-应 变数据,缓冲包装不再需要大量数据,但不是特别直

收稿日期: 2018-01-22

基金项目:江苏高校品牌专业建设工程(PPZY2015A087);江苏省精密制造工程技术研究开发中心开放基金(ZK16-01-04); 南京工业职业技术学院院级重点科研项目(YK16-01-03)

作者简介:刘滨(1964—),男,南京工业职业技术学院副教授、高级工程师,主要研究方向为自动包装生产线。

观^[3];张岩、王志伟等建立了纸蜂窝结构的能量吸收 图,虽然可用于不同材料,但在应变率高的情况下查 表并不方便^[4];孙德强等研究了多层 U 型 A 瓦楞结 构材料的共面力学性能,但对其缓冲设计方法无具体 数据,使用时不太方便^[5]。上述文献利用传统实验手 段研究了瓦楞纸板的缓冲性能,也使用能量吸收图研 究了蜂窝纸板的性能,文中拟建立基于能量吸收图的 U 型 A 瓦楞结构材料缓冲模型,并拟合数据方程,为 缓冲包装设计提供依据。

1 能量吸收模型

对物体压缩性能进行分析测试,通常对商品包装件进行跌落实验。若不计空气阻力及摩擦力,跌落时,物体的势能全部转化为缓冲材料的变形能量^[6],运动的规律表示为:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \int_0^D F(s)ds = mg(H+D) \tag{1}$$

还可以表示为:

$$\frac{1}{2}mv^2 + AD\int_0^{\varepsilon_n} \sigma d\varepsilon = mg(H+D)$$
(2)

式中: m 为物体的质量; v 为物体运动速度; F 为作用在缓冲材料上的力; H为跌落高度; σ 为作用 在缓冲材料上的应力; D 为所需缓冲材料厚度; s 为 缓冲材料压缩距离; A 为接触面积; ε 为应变; ε_n 为 缓冲材料的最大应变。

当物体的运动速度为0时,由式(2)得:

$$AD\int_{0}^{\varepsilon_{n}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon = mg(H+D) \tag{3}$$

即在自由跌落过程中,物体势能全部被缓冲材料 所吸收,大小等于缓冲材料在变形中所受到的作用力 与变形量的积分。

假设 W 为单位体积吸收能量,则:

$$W = \int_{0}^{\varepsilon_{n}} \sigma d\varepsilon$$
(4)
将式(4)代人式(3)换得:

$$W = \frac{mg(H+D)}{4D}$$
(5)

由式(4)可知,如果物体的质量、接触面积和 跌落高度确定,得到 W 的数值,就能计算出缓冲材 料的厚度。在缓冲包装设计时绘制 W 与 σ(最大许用 应力)曲线,可以有效提高设计的效率。

2 有限元模型设计与实验条件设置

以 U 形瓦楞纸板模型来进行研究,其结构见图 1^[7],该模型中所有圆弧的半径均为 *R*。上下水平方向的面纸与芯纸所形成的弧相切,面纸长度为 4*R*,所用纸张厚度设为 *d*, *x*₁-*O*-*x*₂平面垂直方向上的深度设为 *b*。



图 1 U形瓦楞结构 Fig.1 U shaped corrugated structure

U形瓦楞的相关密度为:

$$\frac{\overline{\rho}}{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) \frac{d}{R}$$
(6)

式中: ρ , ρ_s 分别为瓦楞纸板的表现密度和致密 芯纸密度。

建立模型时,设*d*=0.2 mm,*R*值可由式(1)计 算得出。使用 Abaqus 6.12 软件分别建立相关密度为 0.25,0.15,0.12,0.08 的单层 U 型瓦楞纸板模型, 用于获取其共面力学性能,采用六面体单元对模型进 行网格划分,模型见图 2。在 2 个刚性平板中间加载 U形瓦楞纸板的模型,为保证其共面变形模式,设定 模型所有节点的位移只产生在 *x*₂ 方向。由于环境温 度和湿度对瓦楞纸板力学性能影响较大,实验时设定 温度为 25 ℃,相对湿度为 40%;考虑到实际情况下 瓦楞纸板的面纸与芯纸粘接一起,在软件中设定两者 之间的接触类型为无摩擦;瓦楞纸板跌落冲击时与地 面存在一定的摩擦,故设置模型与下方刚性平板之间 的摩擦因数为 0.025。实验过程中,模型下部刚性平 板保持静止,设置上部刚性平板以不同的恒定冲击速 度向下移动,直到试样被完全压溃。



Fig.2 Single layer U corrugated model

芯纸材料选用定量为 105 g/m² 的纸质材料,其材料属性为:密度 ρ_s =1200 kg/m³,泊松比 v_s =0.278,弹性模量 E_s =25.1 GPa,屈服应力 σ_{ys} =0.511 MPa。由于 瓦楞纸板面纸基本无缓冲作用,为简化试验模型,设置面纸材料属性与芯纸材料属性相同。

3 能量吸收曲线的绘制

3.1 不同相对密度瓦楞纸板应力-应变曲线的绘制

设定刚性冲击板压缩速度为 1 mm/s, 对相对密度分别为 0.08, 0.12, 0.15, 0.25 的瓦楞纸板试样进行静态平压实验,记录并绘制应力-应变曲线,见图 3。可以看出,不同相关密度瓦楞纸板应力-应变曲线均呈现曲折上升趋势。第 1 部分表现为弹性部分,呈线

性关系;第2部分呈曲折式上升行为,这一部分缓冲 材料主要进行了能量的吸收,随着相关密度的增加, 不同纸板的最大许用应力在不断增加,但不同纸板达 到最大许用应力的应变值降低;第3部分应力快速、 急剧上升,此时材料被完全压实,进入密实化区^[8–10]。



图 3 不同相对密度瓦楞纸板应力-应变曲线 Fig.3 Stress-strain curves of corrugated cardboard with different relative density

3.2 同一应变速率下各瓦楞纸板能量吸收曲线的 绘制

结合文中的能量吸收模型,利用材料的应力-应 变曲线可以生成材料的能量吸收曲线。设缓冲材料各 个时刻的应变能为 W(单位体积吸收能量),各个时 刻缓冲材料承受的应力为 σ。利用软件提取压缩过程 中的应力和应变数据,然后通过计算得到压缩过程的 应变能,最后绘制出 W-σ 曲线。相对密度分别为 0.08, 0.12, 0.15, 0.25 的瓦楞纸板在应变率为 1 mm/s 时的 W-σ 曲线见图 4。



图 4 同一应变速率不同相关密度 U 型瓦楞纸板能量吸收 Fig.4 Energy absorption of U corrugated cardboard with same strain rate and different density

实际情况中,当缓冲材料刚刚被完全压实时,缓 冲材料吸收能量最多,能够很好地保护商品。此时, 缓冲材料承受应力也刚好就是被保护商品的最大许 用应力,由图4中相对密度曲线可以看出:不同密度 的瓦楞纸板都在达到最大许用应力后,纸板承载的应 力明显增加,但纸板单位体积吸收的能量基本没有变 化,证明纸板被完全压实,不再具备缓冲性能。若将 不同密度瓦楞纸板的最大许用应力点连接,可形成一 条许用应力线,见图 4。许用应力线表示在应变速率 一定的条件下,不同相关密度瓦楞纸板的单位体积吸 收最大能量和许用应力之间的数量关系^[11-12]。

3.3 不同应变速率下各瓦楞纸板能量吸收曲线的 绘制

通过设置不同的应变速率,对相关密度分别为 0.08,0.12,0.15,0.25的瓦楞纸板进行压缩实验, 然后分别绘制相关密度为0.08,0.12,0.15,0.25的 瓦楞纸板在不同应变速率下的许用应力线,得到 U 型瓦楞纸板的能量吸收曲线,见图 5^[13]。相关密度线 代表同一相关密度瓦楞纸板,在不同应变速率下的许 用应力线;应变率线代表同一应变速率下,不同相关 密度瓦楞纸板的许用应力线^[14]。



图 5 不同应变速率和不同相关密度 U 型瓦楞 纸板能量吸收

Fig.5 Energy absorption of U corrugated cardboard with different strain rate and different relative density

图 5 中的线条使用测量点进行拟合,在拟合过程 中发现,同一应变速率下,不同相关密度瓦楞纸板的 许用应力线互相平行,且间距与应变率有关;同一相 关密度瓦楞纸板,在不同应变速率下的许用应力线也 相互平行,且间距与相关密度有关。应变速率为1, 1.5,2,3,4 mm/s 的包迹线曲线方程分别为 *Y* = 0.039*X*+16889,*Y*=0.039*X*+26384,*Y*=0.039*X*+35879, *Y*=0.039*X*+54869,*Y*=0.039*X*+73859。为提高以上公式 的使用性,引入应变率参数进行方程的统一描述,得 到以下应变率方程:

 $W_1 = 0.039\sigma + 16889 + 18990(\dot{\varepsilon} - 1) \tag{7}$

式中: σ 为应力(Pa); $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; W_1 为一定 厚度纸质缓冲材料单位体积需要吸收的能量(J)。

该方程在已知应变率和产品最大许用应力的情况下,用来计算缓冲材料单位体积需要吸收的能量。

如果冲击动能和承载面积已知,将根据式(7)计算 得到的 W₁值代入式(8)来计算缓冲所需 U 型多层 纸板的厚度。

$$D = \frac{U}{W_1 A} \tag{8}$$

式中: U为冲击动能 (J); A 为承载面积 (m²)。

图 5 中相关密度 0.25, 0.15, 0.12, 0.08 的包迹 线曲线方程分别为 Y=0.087X-117961.84, Y=0.087X-46085.32, Y=0.087X-24202.84, Y=0.087X+5631.944。 同样,为提高以上公式的使用性,引入相关密度参数 进行方程的统一描述,得到以下应变率方程。

 $W_2 = 0.087\sigma - 117961.84 + 718765.2(0.25 - \rho) \quad (9)$

式中: σ 为应力 (Pa); ρ 为相关密度, 取值范围 为 (0, 1); W_2 为单层缓冲材料单位体积能够吸收的 能量 (J)。

由于相关密度最大值为 1,所以在最大许用应力 一定的情况下, W₂存在最大值,即单层结构在最大 许用应力一定的情况下,吸收的能量有极大值。若跌 落冲击能量过大,需要增加 U 型瓦楞层数,引入层 数参数^[15]。

$$\rho = \rho^* / \rho_s = (1 + \pi/4) d/R \tag{11}$$

所以:

$$N = \frac{D}{2R} = \frac{D\rho}{2(1 + \pi/4)d}$$
 (12)

结合式 (9—12),可推出最终相关密度方程: $W_1 = \frac{D\rho}{2\left(1+\frac{\pi}{4}\right)d} (0.087\sigma - 117961.84 + 718765.2(0.25 - \rho))$ (13)

4 相关密度和应变率方程的应用

4.1 纸质缓冲材料厚度的计算

假设被包装产品质量 *m*=10 kg、承载面积 *A*=0.001 m²,跌落高度*H*=0.5 m,冲击动能 *U*=50 J, 脆值 *a*=40,则 *σ*=400 kPa。

初始设定使用厚度 D=0.05 m 的瓦楞纸板进行缓冲,则根据应变率= $\sqrt{2gH}/D$,估算出应变率数值为 63.2 。 通 过 应 变 率 方 程 $W_1 = 0.039\sigma + 16889 +$ 18990($\dot{\varepsilon} - 1$),得到 $W_1 = 1276.067$ kJ。根据计算得到的 W_1 ,再由 $D = \frac{U}{W_1A}$ 修正瓦楞纸板缓冲厚度,D=0.047 m。发现初始设定厚度为 0.05 m,修正后厚度 为 0.047 m,误差为 0.6%。 在使用该类纸质缓冲材料时,设计人员可根据实际需要设定修正后的厚度与设定厚度的最大允许误差。假设设计人员设定的最大允许误差为 0.2%,此时的误差为 0.6%,则需要再次修正缓冲材料厚度。 方法是将上一次计算的修正厚度作为下一次计算的 设定厚度重新进行计算,以此类推,直到修正后的厚度与设定厚度的最大允许误差达到要求。

设定使用厚度 D=0.047 m 的瓦楞纸板作为缓冲 材料进行再次计算, $\dot{\varepsilon} \approx \sqrt{2gH}/D = 67.28$, $W_1=$ 1291.1462 kJ, $D = \frac{U}{W_1A} = 0.0462$ m。计算得到误差 为 0.17%, 达到误差要求, 因此对于以上被包装产品 应使用厚度为 0.0462 m 的 U 型瓦楞纸板。

4.2 瓦楞纸板相关密度的优化

在已知缓冲厚度的情况下,利用相关密度方程能快速准确地优化制造纸板的最佳相关密度。以前文被包装产品为例,D=0.0462 m,U=60 J,A=0.001 m², $\sigma=400$ kPa,则根据W=U/AD求出W,并代入式(13),解得 $\rho=0.13$,N=8.41,即可知需要9层纸板。

5 结语

通过建立各相关密度 U 型瓦楞纸板的有限元模 型,从得到的应力-应变曲线可知,随着相关密度的 增加,不同纸板的最大许用应力在不断增加,但不同 纸板达到最大许用应力的应变值减少,证明存在能量 吸收的最佳相关密度。从瓦楞纸板单位体积吸收能量-应力数据来看,瓦楞纸板不同相关密度曲线许用应力 点的连线呈线性关系。实践证明,拟合出的相关密度 方程和应变率方程,不仅能够提高能量吸收曲线的使 用性,而且可提高缓冲包装设计的程序优化提供 了一定的参考。

参考文献:

 高德.包装应用力学[M].北京:中国轻工业出版社, 2015.
 GAO De. Packaging Application Mechanics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015.
 [2] 黄蜜,吴淑芳.EBE 楞瓦楞纸板缓冲曲线研究[J].包 装工程, 2011, 32(13): 28—31.

HUANG Mi, WU Shu-fang. EBE Corrugated Cardboard Buffer Curve Study[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 28—31.

[3] 卢富德,高德.C 楞瓦楞纸板动态缓冲模型及应用
[J].功能材料,2012,43(1):39—41.
LU Fu-de, GAO De. Dynamic Cushioning Model of C-Flute Corrugated Cardboard and Its Application[J].
Chinese Journal of Functional Materials, 2012, 43(1): 39—41.

[4] 张岩, 王志伟. 湿度对手机用纸浆模塑缓冲包装能量吸收特性的影响[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 39—43.

ZHANG Yan, WANG Zhi-wei. Effect of Humidity on Energy Absorption Characteristics of Pulp-molded Buffer Packaging for Mobile Phones[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(1): 39–43.

- [5] 孙德强,方众望. 多层 U型 A 瓦楞结构材料的共面 力学性能[J].包装工程,2014,35(13):8—14.
 SUN De-qiang, FANG Zhong-wang. The Mechanical Properties of Structural Materials Multilateralism U A Type Corrugated[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13):8—14.
- [6] 鄂玉萍,王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究 进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 40—45.
 E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Research Progress in Energy Absorption Characteristics of Paper Cushioning Materials[J]. Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40—45.
- [7] 卢富德,陶伟明. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 11(8):53—56.
 LU Fu-de, TAO Wei-ming. Virtual Quality Analysis of Compression Response of Series Buffer Structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition),

2012, 11(8): 53—56.
[8] 高德, 卢富德. 基于杆式弹性易损部件的非线性系 统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 47—49.
GAO De, LU Fu-de. Research on Drop Impact of Non-

linear System Based on Rod-type Elastic Consumable Parts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 47—49.

 [9] 卢富德,陶伟明,高德.具有简支梁式易损部件的产品包装系统跌落冲击研究[J].振动与冲击,2012, 31(15):79—81.
 LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Drop Impact of

LU Fu-de, IAO Wei-ming, GAO De. Drop Impact of Product Packaging System with Simply Supported Beam Consumable[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 79-81.

[10] 卢富德,高德.考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J].振动工程学报,2012,25(3):335—341.
 LU Fu-de, GAO De. Study on Dropping Impact of

Product Packaging System Considering Cushioning of Honeycomb Carton[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3): 335—341.

- [11] 苏远. 缓冲包装理论基础与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
 SU Yuan. The Basis and Application of Buffer Packaging Theory and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [12] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装 系统优化设计[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 69—72.
 GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of Multiple Freedom Drop Packaging System for Polyethylene Cushioning Material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [13] 高德, 卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 6—11.
 GAO De, LU Fu-de. Study on Impact Response of Buffer System Considering Rotating Hyperbolic Tangent and Tangent Model[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.
- [14] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力 学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 31—34.
 LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of Combined Cushioning System for Corrugated Paper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 31—34.
- [15] 孙德强,张卫红,孙玉瑾. 蜂窝铝芯的弹性模量和材 料效率分析[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 35—40. SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong, SUN Yu-jin. Elasticity Modulus and Material Efficiency Analysis of Honeycomb Aluminum Core[J]. Mechanics and Engineering, 2008, 30(1): 35—40.