

B 楞瓦楞纸板本构模型及其应用

李正伟, 李无穷

(浙江大学, 杭州 310027)

摘要: 瓦楞纸板因其可降解及优良的缓冲性能, 常用于运输包装中。用万能试验机得到了 B 楞瓦楞纸板的静态应力-应变曲线, 再用最小二乘法拟合出了此纸板的静态本构关系。然后, 根据所拟合的曲线, 计算出了 B 楞瓦楞纸板的缓冲系数-最大应力曲线。最后, 给出了一个 B 楞瓦楞纸板的承载算例。

关键词: B 楞瓦楞纸板; 应力-应变曲线; 缓冲曲线

中图分类号: TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)21-0042-03

Constitutive Relation of B-flute Corrugated Paperboard and Its Applications

LI Zheng-wei, LI Wu-qiong

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Because of its degradable and excellent cushioning properties, corrugated paperboard is commonly used in transport packaging. The strain-stress curve of corrugated paperboard with B-flute was obtained by quasi-static compression experiment. The constitutive relation was fitted using least square method. Then, according to the fitting curve, the cushion coefficient-max stress curve of corrugated paperboard with B-flute was calculated. At last, an example of the paperboard bearing calculation was given.

Key words: B-flute corrugated paperboard; stress-strain curve; cushion curve

振动与冲击是包装系统最常见的外界激励, 而表征振动与冲击最基本的量值是加速度。Mindlin^[1]首次提出了易损度概念, 认为产品破损失效与否主要取决于其承受的峰值加速度是否超过产品所能承受的极限值。卢富德^[2-3]等人对立方非线性和正切非线性双层包装件在矩形方波冲击下的破损边界曲线进行了研究; 高德等人研究了具有转动包装系统的正切非线性模型冲击响应^[4]。破损边界曲线不便于直接用于缓冲包装设计, 近年来国内外出现了一些本构关系的报道文章^[5-9]。

瓦楞纸板是一种新型的环保包装材料, 其独特的瓦楞结构具有优良的力学性能与缓冲性能。随着瓦楞纸板的广泛使用, 关于它在包装领域的性能研究也越来越受到人们的重视。瓦楞纸板应力-应变曲线较复杂, 不能直接被设计人员利用, 设计人员目前用的是比较方便的缓冲曲线。笔者通过压缩实验, 得到 B

楞瓦楞纸板的本构关系, 并利用本构函数曲线计算出了缓冲系数-最大应力曲线, 为缓冲包装设计提供参考。

1 实验

实验设备及条件: 液压万能试验机(深圳市新三思材料检测有限公司, CMT6103, 最大轴力 5 kN); 空气相对湿度 60%, 温度 25 ℃。

实验方法: 将处理好的样品纸板放在万能试验机上指定地方; 设置好相关参数, 静压速度设为 2 mm/min 左右, 压缩过程中记录好压力及变形位移, 当压缩至 80% 左右时停止压缩; 选择 3 块大小相同的试样, 重复 3 次实验, 取平均值作为实验结果。

实验用 B 楞瓦楞纸板(DELL 机箱包装纸板), 试样取正方形, 尺寸为 60 mm×60 mm, 参数见表 1。

收稿日期: 2011-09-08

作者简介: 李正伟(1986—), 男, 河南新乡人, 浙江大学硕士生, 主攻应用材料力学。

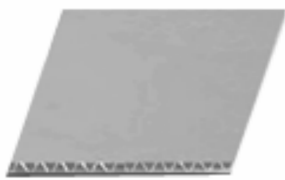


图 1 B 楞瓦楞纸板实物

Fig. 1 Picture of the B-flute corrugated paperboard

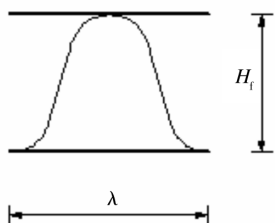


图 2 棱型结构

Fig. 2 Flute structure

表 1 B 楞瓦楞纸板的结构参数

Tab.1 Structural parameters of B-flute corrugated paperboard

棱形	波长 λ /mm	楞高 H_f /mm
B	5.8	2.7

2 应力-应变曲线

如图 3 所示,以压头与 B 楞瓦楞纸板刚接触的位置为坐标原点,坐标正方向向下。由于瓦楞纸板材料结构的非均匀性和各向异性,其应力取名义应力:

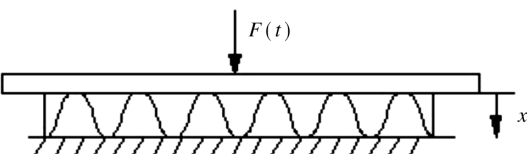


图 3 静压原理

Fig. 3 Schematic diagram of static compression

置为坐标原点,坐标正方向向下。由于瓦楞纸板材料结构的非均匀性和各向异性,其应力取名义应力:

$$\sigma(t) = F(t)/A \quad (1)$$

式中: $\sigma(t)$ 为名义应力; $F(t)$ 为平压力; A 为试样面积。

相应的应变也即名义应变:

$$\epsilon(t) = x(t)/h \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 为压缩变形量; h 为试样初始厚度。

根据式(1)与(2)处理实验中得到的数据,得到的应力-应变见图 4 中的虚线。

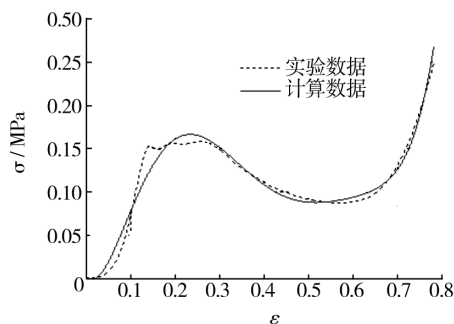


图 4 应力-应变曲线与拟合曲线

Fig. 4 Stress-strain and fitted curves of

B-flute corrugated paperboard

其中拟合所得到的本构函数为:

$$\sigma = a_1 \epsilon + a_2 \epsilon^2 + a_3 \epsilon^3 + a_4 \epsilon^4 + a_5 \epsilon^5 + a_6 \epsilon^6 \quad (3)$$

式中: $a_1 \sim a_6$ 为待识别参数。

由最小二乘法拟合得到待识别参数为:

$$a_1 = -0.4879, a_2 = 23.1934, a_3 = -135.2500,$$

$$a_4 = 322.2210, a_5 = -351.4502, a_6 = 146.1704$$

将 $a_1 \sim a_6$ 代入式(3)中,可得到应力-应变拟合曲线,见图 4 中的实线。

3 B 楞瓦楞纸板缓冲系数-最大应力曲线

缓冲系数 c -最大应力 σ_m 曲线,其定义为单位能量所引起的最大应力,定义表达式为:

$$c = \frac{\sigma_m}{\int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon} \quad (4)$$

由图 4 可以看到,B 楞瓦楞纸板的应力-应变曲线不是单调上升的,具有波动性,因此,此纸板的缓冲系数-最大应力曲线必须用分段方法来处理^[10]。

1) 由图 4 的应力-应变曲线知,当 $0 < \epsilon_m < 0.2369$ 时,其最大应力与最大应变处在同一个点,利用式(4)可计算出相应区间的缓冲系数-最大应力曲线。

2) 当 $0.2369 < \epsilon_m < 0.7378$ 时,最大应变与最大应力不再处于同一个点,此时最大应力应取 $\sigma_A = \sigma(0.2369) = 0.1664$ 。

相应的缓冲系数-最大应力曲线计算公式应为:

$$c = \frac{\sigma_A}{\int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon} \quad (5)$$

3) 当 $\epsilon_m > 0.7378$ 时,最大应变与最大应力又处于同一点,此时的缓冲系数-最大应力曲线计算式仍

用式(4)。

计算所得的缓冲系数-最大应力曲线见图 5, 图中

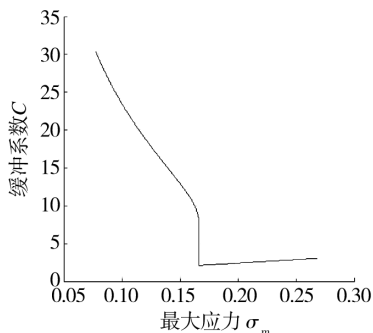


图 5 B 楞瓦楞纸板的缓冲系数-最大应力曲线

Fig. 5 Cushion coefficient-maximum stress of B-flute corrugated paperboard

可以清楚地看到一段竖直线段, 由于应力-应变曲线的波动性, 造成了缓冲系数计算中必不可少的分段性。

4 算例

假设一电子产品质量 $m=6\text{ kg}$, 易损度 $G_m=80$, 跌落高度 $H=0.25\text{ m}$, 用 B 楞瓦楞纸板作为缓冲材料, 材料的厚度为 $h=0.0041\text{ m}$, 要求底垫面积小于 0.024 m^2 , 对其进行缓冲包装设计。

解: 如果使用一块瓦楞纸板, 那么缓冲系数:

$$c = \frac{hG_m}{H} = \frac{0.0041 \times 80}{0.25} = 1.3120$$

$C=1.3120$, 图中最低点处的 $C=1.9956$, 此时的 C 值与图中没有交点, 说明一块板不能满足条件。

取 2 块板时:

$$c = \frac{2hG_m}{H} = \frac{2 \times 0.0041 \times 80}{0.25} = 2.6240$$

在缓冲曲线中作 $C=2.6240$ 的水平线, 与曲线交于 2 点, 见图 6, 取右边点 $(0.4487, 3.416)$ 为设计

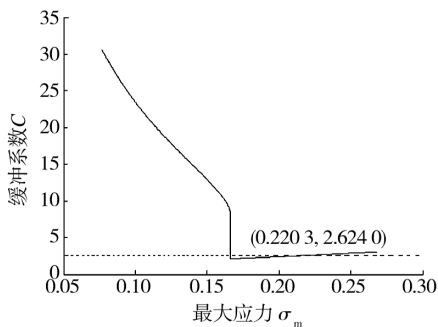


图 6 求解过程

Fig. 6 Procedure of calculation

点, 此时应力较大, 面积 $S = \frac{G_m mg}{\sigma_m}$ 会较小, 这样有利于材料的经济性, 所以最大应力 $\sigma_m = 0.2203\text{ MPa}$ 。

求出缓冲面积:

$$S = \frac{G_m mg}{\sigma_m} = 0.0214\text{ m}^2 < 0.024\text{ m}^2$$

使用 2 块 B 楞瓦楞纸板串联, 其面积为 0.0214 m^2 , 可满足缓冲要求。

5 结论

1) 由于拟合应力-应变曲线函数具有一定的波动性, 在算缓冲系数时, 有些点处的最大应变与最大应力不处于同一个点, 因此, 用拟合函数算得的最大应力-缓冲系数曲线中会出现一条竖直小线段。

2) 在实验纸板压缩至 80% 的有效区域内, 算例中以节约、经济为目的时, 2 块纸板串联是最优的选择。

参考文献:

- [1] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3, 4): 353-461.
- [2] 卢富德, 高德, 梁爱锋. 立方非线性双层包装在矩形方波冲击下破损边界曲线的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 7-10.
- [3] 高德, 卢富德. 两自由度正切非线性系统的冲击响应研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 748-752.
- [4] 高德, 卢富德. 具有转动包装系统的正切非线性模型冲击响应研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 131-136.
- [5] 高德, 王振林, 陈乃立, 等. B 楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. 振动工程学报, 2001, 14(2): 172-177.
- [6] GAO D, WANG Y, LIU Z. A Set of Constitutive Models for a Kind of Corn Straw Fiber Based Composite Cushioning Packaging Material[J]. Adv Mater Res, 2011, 174: 513-516.
- [7] 卢富德, 张绍云, 杜启祥. 发泡聚乙烯隔振性能研究[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 1-4.
- [8] 高德, 王瑜, 卢富德. 基于发泡聚乙烯本构模型的物品缓冲包装设计[C]. 第十三届全国包装工程学术会议论文集, 武汉, 2010: 111-115.
- [9] 高德, 刘壮, 卢富德. 植物纤维聚氨酯复合缓冲包装材料本构关系研究[C]. 第十三届全国包装工程学术会议论文集, 武汉, 2010: 43-47.
- [10] 黄蜜, 吴淑芳, 杜启祥. EBE 楞瓦楞纸板缓冲曲线研究[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 28-31.