环境湿度对 BC 型双瓦楞纸板振动传递率的影响研究

张 丽，王保升

（南京工程学院，南京 211167）

摘要：通过正弦振动试验，研究了不同环境湿度条件下的 BC 型双瓦楞纸板的振动特性，获得了瓦楞纸板的振动传递率曲线、固有频率、阻尼系数和阻尼比。采用回归分析法，建立了环境湿度与振动传递率、固有频率、阻尼系数以及阻尼比之间的单因素关系模型。试验结果表明，环境湿度对 BC 型双瓦楞纸板的防振性能有明显影响。

关键词：瓦楞纸板；振动传递率；环境湿度；固有频率；阻尼系数；阻尼比

中图分类号：TB484.1；TB487 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2011)19-0054-05

Research on Vibration Transmissibility of BC Corrugated Paperboard under Different Environmental Humidity

ZHANG Li，*WANG Bao-sheng*

(Nanjing Institute of Technology，Nanjing 211167，China)

Abstract：The vibration property of BC corrugated paperboard was investigated by sine vibration tests under different environmental humidity，and the vibration transmissibility curves，natural frequencies，vibration transmissibility，damping coefficients and damping ratios of BC corrugated paperboard were obtained. Then corresponding single factor relation models against environmental humidity were established by using regression analysis method. The experimental results showed that environmental humidity has obvious effect on vibration transmissibility of BC corrugated paperboard.

Key words：corrugated paperboard；vibration transmissibility；environmental humidity；natural frequency；damping coefficient；damping ratio

瓦楞纸板具有质量轻、成本低、适印性好、可折叠等优点，广泛应用于产品包装。随着国际贸易和现代物流的迅速发展，各种产品包装件通常需要跨时域、地域、海域、空域流通，其周围环境因素（如温度、湿度等）会发生不同程度的变化。包装材料中，纸类材料受环境温湿度影响最为明显，直接影响其综合性能。针对湿度方面，程小琴[1]等人就环境湿度对瓦楞纸板力学性能的影响进行了分析研究；王俊丽[2]、付云岗[3]等人研究了瓦楞纸箱的含水率对其力学性能的影响。研究表明，瓦楞纸板的力学性能受环境湿度的影响非常显著。

在装卸、运输、存储以及现代物流过程中，包装产品受到的冲击、振动载荷具有普遍性，因包装不善所造成的经济损失也很严重。对产品进行合理的缓冲防振包装，是保证产品在流通环境中不发生破损的关键。防振设计的目的在于调节包装件的固有频率，并且通过选择恰当的阻尼材料，把包装系统（即外包装－衬垫－内装产品）对振动的传递率控制在预定的范围内。朱琼[4]、郭彦峰[5-6]、张家凡[7]等人对不同纸板振动传递特性进行了研究分析；孙聚杰[8]等人分析了疲劳振动对瓦楞纸板承载能力与缓冲性能的影响，但环境湿度对瓦楞纸板的振动传递特性的影响较少见报道。笔者分析不同环境湿度对瓦楞纸板的振动传递率的影响，使瓦楞纸板在较大地域范围使用时，均能提供良好的防振性能，为运输包装设计提供理论基础。

收稿日期：2011-08-12

作者简介：张丽（1970－），女，山西汾阳人，南京工程学院讲师，主要研究方向为机械设计、运输包装等。

1　瓦楞纸板振动传递特性试验

1.1　仪器

DC-600-5 振动试验台、RS-2000 控制仪、SA-5 开关式功率放大器、FJ-1000 鼓风机、DH5920 动态信号分析系统、加速度传感器、信号适调器、质量块、HC-302K 型恒温恒湿箱等。

1.2　试样及预处理

1）试样。BC 型双瓦楞纸板，厚度为 7.1 mm（B 楞高为 2.5～2.8 mm，C 楞高为 3.4～3.8 mm），U 形瓦楞，面积为 20 cm×20 cm。

2）瓦楞纸板预处理。将准备好的 10 个 20 cm×20 cm 的瓦楞纸板试样一起放入 HC-302K 型恒温恒湿箱，首先设定相对湿度为 48%，预处理 24 h 后，迅速从恒温恒湿箱内取出试样，将设备调节到相对湿度为 67%。由于试验应该在与预处理相同的温湿度条件下进行，但是实际环境温度不能达到预处理条件，所以必须在试验样品离开预处理条件 5 min 之内开始试验。当完成环境湿度为 48%条件下的瓦楞纸板的振动传递率试验时，等待环境湿度为 67%的瓦楞纸板预处理完成，依此类推。这样对瓦楞纸板试样进行预处理可以大大节约时间，提高效率，也使试验更为准确。

1.3　原理

试验在同一静应力下进行，静应力 $\sigma=W/A$，W 为质量块的重量，$m=2.9$ kg，A 选取面积为 20 cm×20 cm 的 BC 型瓦楞纸板，则静应力为 0.710 5 kPa。

振动传递特性一般采用振动传递率曲线、振动传递率、峰值频率、阻尼比等描述。双瓦楞纸板的振动传递率曲线及其特征是用作缓冲防振包装的基本数据，试验方法采用 GB 8169－87《包装用缓冲材料振动传递特性试验方法》[9]。

模拟包装件在正弦振动激励下 BC 型双瓦楞纸板的受力状态。2 块 BC 型双瓦楞纸板试样分别放在质量块的上下位置，将固定装置的盖板压在质量块上部的试样上，并适当地固定，见图 1。将加速度传感器分别安装在质量块上和振动台体上，分别测量振动台体的振动加速度和质量块的加速度。质量块上安放 2 个传感器，输出结果取平均值，保证了数据的准确性。

在试验中，由质量块、BC 型双瓦楞纸板、固定装置、传感器以及振动台构成的振动系统，可视为有支座激励的单自由度线性振动系统，在正弦激励下，该系统的振动传递率 T_r 的计算公式为：

$$T_r=\sqrt{\frac{1+(2\xi\lambda)^2}{(1-\lambda)^2+(2\xi\lambda)^2}} \tag{1}$$

式中：λ 为频率比；ξ 为阻尼比。当系统共振时，频率比 $\lambda=1$，由式(1)得到阻尼比的计算公式为：

$$\xi=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{T_r^{\,2}-1}} \tag{2}$$

阻尼比也定义为实际的粘性阻尼系数 C 与临界阻尼系数 C_r 之比，即 $\xi=C/C_r$。$\xi=1$ 时，此时的阻尼系数称为临界阻尼系数，临界阻尼系数 $C_r=2m\omega_n$。所以，阻尼系数的计算公式为：

$$C=\xi C_r=2\xi m\omega_n \tag{3}$$

式中：C_r 为临界阻尼系数；m 为质量；ω_n 为固有圆频率。

2　试验结果处理

2.1　振动传递率曲线

振动传递特性指的是包装件在振动激励下，质量块的响应加速度与振动台的激励加速度之间幅值的比值。采用正弦扫描振动试验，得到了不同环境湿度的瓦楞纸板在同一静应力（$\sigma=0.710\ 5$ kPa）条件下的振动传递特性。由振动传递率试验数据，可以得到 BC 型双瓦楞纸板在不同环境湿度条件下的振动传递率-频率的曲线，见图 2。

2.2　试验数据处理

通过正弦振动试验，得到 BC 型双瓦楞纸板的振动传递率曲线以及峰值频率和最大振动传递率。然后对试验数据进行处理，研究不同环境湿度对瓦楞纸板的固有频率、最大传递率、阻尼比以及阻尼系数的影响。试验数据见表 1。

表 1　BC 型双瓦楞纸板振动试验数据

Tab.1 Vibration test results of BC corrugated paperboard

序号	环境湿度/%	峰值频率 f_r/Hz	传递率 T_r	阻尼比 ξ	阻尼系数 c
1	48	250	2.425 8	0.226 2	2 059.78
2	67	180	2.043 8	0.280 5	1 839.05
3	75	113	2.013 5	0.286 1	1 177.56
4	85	95	1.879 9	0.314 1	1 086.87
5	95	79	1.66	0.377 4	1 085.97

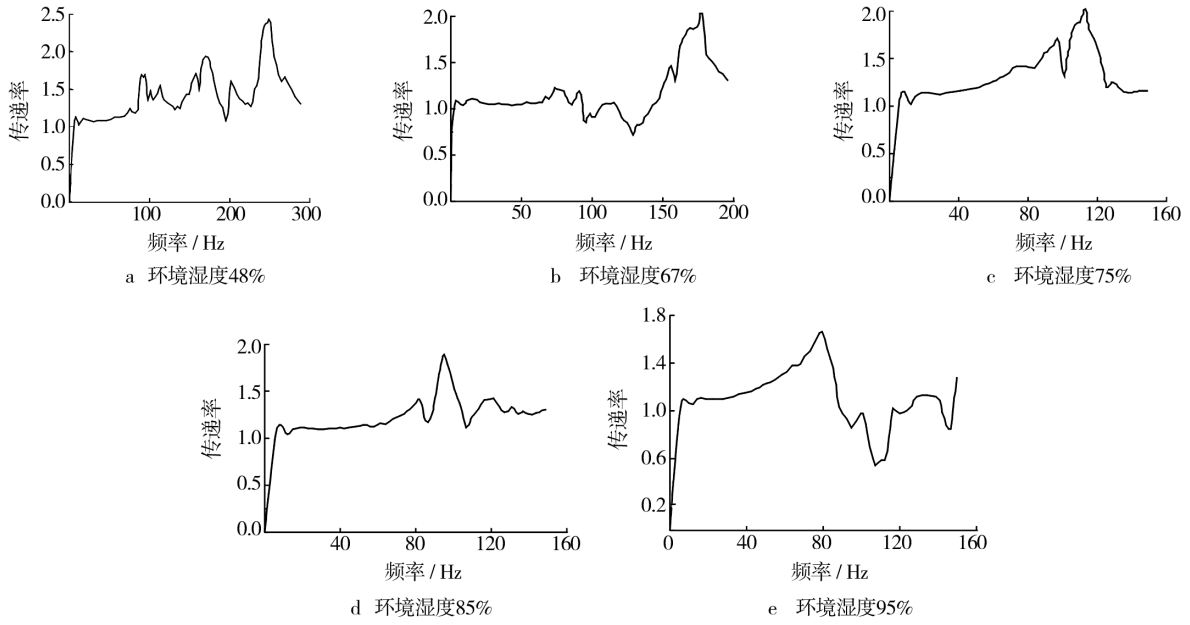

图 2 不同环境湿度下的振动传递率曲线

Fig. 2 Vibration transmissibility curves under different environmental humidity

峰值频率 f_r、振动传递率 T_r 是试验测得的结果，阻尼比 ξ 由式(2)计算得到。当振动频率达到固有频率时会发生共振，由于峰值频率是物体发生共振($\lambda \approx 1$)时的频率，所以固有频率 f_n 数值上等于峰值频率 f_r。

利用 orgin8.0 软件对试验数据进行拟合处理，得到环境湿度与固有频率、最大传递率、阻尼比、阻尼系数的关系式及决定系数 R^2，见图 3－6。R^2 是衡量变量与参数(自变量)间的回归或拟合关系优劣的主要特征指标，其值越接近 1，表示拟合效果越好。

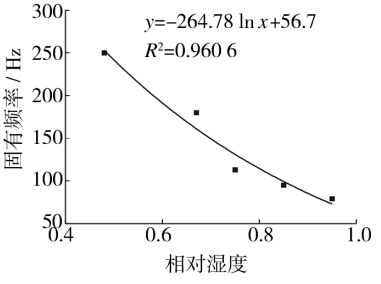

图 3 环境湿度对固有频率的影响

Fig. 3 The relationship between environmental humidity and natural frequency

3 结果分析

3.1 环境湿度对固有频率的影响

由于环境湿度增大会使瓦楞纸板的硬度降低、质量增大，所以根据理论分析可知，随环境湿度增大，瓦楞纸板的固有频率降低。通过试验数据处理得到环境湿度与 BC 型瓦楞纸板固有频率的关系见图 3。由图 3 可以得到：

1) 随着环境湿度的增加，瓦楞纸板的固有频率降低。

2) 环境湿度为 95%时瓦楞纸板的固有频率比环境湿度为 48%时下降了约 68.4%，下降幅度很大。以常湿(65%)为基准，环境湿度为 95%时的固有频率比环境湿度为 67%的固有频率下降了约 56.1%，下降幅度较 48%时的下降幅度减缓了。说明环境湿度较低时瓦楞纸板的固有频率下降幅度较大，环境湿度较高时瓦楞纸板的固有频率下降幅度较平稳。

由图 3 中的拟合方程式可看出，环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板的固有频率呈对数递减的关系。

3.2 环境湿度对最大传递率的影响

系统发生共振时，$\lambda \approx 1$，瓦楞纸板的最大振动传递率与阻尼比呈反比关系。随着环境湿度的增加瓦楞纸板的阻尼比增大，因此理论上可知环境湿度增加，瓦楞纸板的最大传递率减小。

通过试验数据处理可得到环境湿度与 BC 型瓦楞纸板最大振动传递率的关系，见图 4，可以得到：

1)随着环境湿度的增加，瓦楞纸板的最大振动传

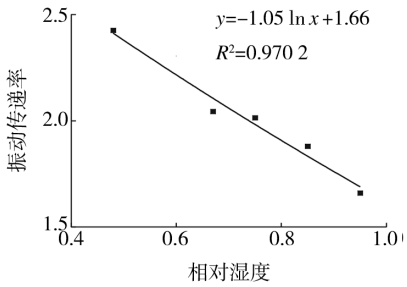

图 4　环境湿度对振动传递率的影响

Fig. 4 The relationship between environmental humidity and vibration transmissibility

递率降低。

2)环境湿度为 95%时瓦楞纸板的最大振动传递率比环境湿度为 48%时下降了约 31.6%,下降幅度较大。以常湿(65%)为基准,环境湿度为 95%时的最大传递率比环境湿度为 67%的最大传递率下降了约 18.8%,下降幅度较 48%时的下降幅度减缓了。说明环境湿度较低时下降幅度较大,环境湿度较高时瓦楞纸板的最大振动传递率下降幅度较平稳。

由图 4 中的拟合方程式可以看出,环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板最大振动传递率呈对数递减的关系。

3.3　环境湿度对阻尼系数的影响

阻尼是反映瓦楞纸板振动过程中能量消散特征的参数,是影响瓦楞纸板振动响应的重要因素之一。有足够的阻尼存在,就意味着瓦楞纸板在振动中能够吸收较多的能量,可以有效减小振幅和应力。

通过试验数据处理得到环境湿度与 BC 型瓦楞纸板阻尼系数的关系,见图 5。由图 5 可以得到:

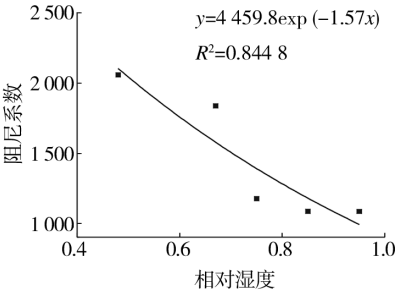

图 5　环境湿度对阻尼系数的影响

Fig. 5 The relationship between environmental humidity and damping coefficient

1) 随着环境湿度的增加,瓦楞纸板的阻尼系数减小。

2) 环境湿度为 95%时瓦楞纸板的阻尼系数比环境湿度为 48%时瓦楞纸板的阻尼系数下降了约 47.3%,下降幅度较大。以常湿(65%)为基准,环境湿度为 95%时的阻尼系数比环境湿度为 67%时下降了约 40.9%,下降幅度较 48%时的下降幅度减缓了。说明环境湿度较低时瓦楞纸板的阻尼系数下降幅度较大,环境湿度较高时瓦楞纸板的阻尼系数下降幅度较平稳。

由图 5 中的拟合方程可以看出,环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板阻尼系数呈以 e 为底的指数关系,是递减趋势。

3.4　环境湿度对阻尼比的影响

阻尼比与瓦楞纸板的固有频率和阻尼系数有关,由前面可知,环境湿度从 95%降到 48%时瓦楞纸板的固有频率下降了约 68.4%,瓦楞纸板的阻尼系数下降了约 47.3%,瓦楞纸板的固有频率下降幅度较大,则由式(3)可知,瓦楞纸板的阻尼比理论上将随环境湿度的升高而增大。

通过试验数据处理得到的环境湿度与 BC 型瓦楞纸板阻尼比的关系见图 6。由图 6 可以得到:

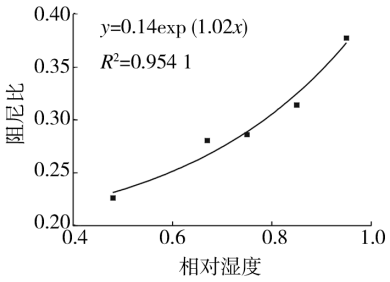

图 6　环境湿度对阻尼比的影响

Fig. 6 The relationship between environmental humidity and damping ratio

1) 随着环境湿度的增加,瓦楞纸板的阻尼比增大。

2) 环境湿度为 95%时瓦楞纸板的阻尼比比环境湿度为 48%时升高了约 66.8%,升高幅度很大。以常湿(65%)为基准,环境湿度为 95%时的阻尼比比环境湿度为 67%的阻尼比升高了约 34.5%,升高幅度较 48%时的升高幅度明显降低了。说明环境湿度较低时瓦楞纸板的阻尼系数升高幅度较大,环境湿度较高时瓦楞纸板的阻尼系数升高幅度较小。

由图 6 中的拟合方程式可以看出,环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板阻尼比呈以 e 为底的指数关系,是递增趋势。

4 结论

分析了不同环境湿度的 BC 型双瓦楞纸板的振动传递特性，对 BC 型双瓦楞纸板在缓冲防振包装中的应用提供了基本数据。通过对试验数据的处理，分析了不同环境湿度对 BC 型双瓦楞纸板振动传递特性的影响，得出了以下结论。

1）环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板阻尼系数是以 e 为底的指数关系，呈递减趋势，即随着环境湿度的增加，瓦楞纸板的阻尼系数减小。

2）环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板阻尼比呈指数关系，是递增趋势，即随着环境湿度的增加，瓦楞纸板的阻尼比增大，对振动的衰减性增大。

3）环境湿度与 BC 型双瓦楞纸板的最大振动传递率和固有频率呈对数递减的关系。随着环境湿度的增加，瓦楞纸板的最大振动传递率和固有频率降低，瓦楞纸板趋于共振的频率降低，在缓冲包装设计时应避开振动传递率大的峰值频率，避免对产品产生过大的振动放大作用。

4）从瓦楞纸板的振动传递特性综合考虑，应避免较高湿度的环境，对于南方相对湿度经常大于 80％的情况，可以通过在其表面涂一层防潮材料等方法，使水、油等无法与材料的表面直接接触，达到防潮的目的，从而保证瓦楞纸板的包装可靠性。

参考文献：

[1] 程小琴，马庭，王一临. 环境湿度对瓦楞纸板力学性能的影响[J]. 包装工程，2002，23(1)：17－18.

[2] 付云岗，郭彦峰，许文才，等. 不同温湿度条件下双瓦楞纸板力学性能的试验研究[J]. 包装工程，2008，29(4)：51－53.

[3] 王俊丽，郑全成. 瓦楞纸箱的含水率对力学性能的影响[J]. 兰州交通大学报，2006，25(3)：134－136.

[4] 朱琼，郭彦峰，李佳，等. X-PLY 超强瓦楞纸板振动传递特性研究分析[J]. 包装工程，2008，29(11)：25－27.

[5] 郭彦峰，付云岗，韩姗姗，等. 折叠型双瓦楞纸板衬垫振动传递特性的试验研究[J]. 包装工程，2009，30(6)：34－36.

[6] 郭彦峰，朱大鹏. 蜂窝纸板振动传递特性测试分析[J]. 包装工程，2003，24(1)：12－13.

[7] 张家凡，陈杰，吴国图. 瓦楞纸板与 EPS 板材组合包装垫振动传递特性的试验研究[J]. 包装工程，2007，28(9)：12－15.

[8] 孙聚杰，卢立新. 疲劳振动对瓦楞纸板承载能力与缓冲性能的影响[J]. 包装工程，2007，28(5)：21－23.

[9] 郭彦峰，许文才，付云岗，等. 包装测试技术[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

（上接第 21 页）

[2] APPENDINI P，HOTCHKISS J H. Review of Antimicrobial Food Packaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2002(3)：113－126.

[3] 魏华，许文才，李东立. 抗菌技术及其在包装行业中的应用[J]. 包装工程，2008，29(10)：131－133.

[4] FUJISHIMA A，ZHANG X. Titanium Dioxide Photo Catalysis：Present Situation and Future Approaches [J]. C R Chimie，2006(9)：750－760

[5] FUJISHIMA A，RAO T N，TRYK D A. Titanium Dioxide Photo Catalysis[J]. Photoch Photobio C，2000(1)：1－21.

[6] 陈希荣. 新型包装材料中应用的纳米技术[J]. 包装工程，2003，24(6)：4－8.

[7] 夏凡，琚争艳. 食品保鲜中的纳米技术及其安全性研究[J]. 食品科技，2008(5)：263－266.

[8] 杨福馨，吴龙奇. 食品包装实用新材料新技术[M]. 北京：化学工业出版社，2009.

[9] 韩永生，聂柳慧. 纳米二氧化钛保鲜薄膜的保鲜机理和制备[J]. 株洲工学院学报，2004，18(5)：148－150.

[10] 张继武，付莹. 钙制剂涂膜黄瓜保鲜的研究[J]. 食品工业科技，2007，28(7)：189－215.

[11] 张桂. 黄瓜保鲜技术的研究[J]. 食品科学，2003，24(6)：148－151.

[12] 万惠萍，叶淑红，陈丽，等. 壳聚糖膜在黄瓜保鲜中的应用[J]. 大连工业大学学报，2008，27(2)：110－112.

[13] 邓勇. 黄瓜涂膜保鲜的研究[J]. 食品科学，1994，15(12)：69－71.

[14] 姚晓敏，丁金峰. 涂膜保鲜在黄瓜上的应用[J]. 食品工业科技，2000，21(3)：8－10.

[15] GB 4789.2－2010，食品微生物检验 菌落总数测定[S].

[15] CENGIZ C，SECKIN A M，MUHARREM D. Extending the Quality of Fresh Strawberries by Equilibrium Modified Atmosphere Packaging [J]. Eur Food Res Technol，2008，227：1575－1583.

[16] GB/T 6195－86，水果、蔬菜维生素 C 含量测定法[S].

[17] 吴昊，汪东风，张宾，等. 壳聚糖稀土复合物涂膜对黄瓜保鲜及降农残的效果研究[J]. 中国海洋大学学报，2006(12)：52－56.