

道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学响应

彭颀¹, 薛飞², 周强¹

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 太原科技大学, 太原 030024)

摘要: **目的** 研究运输车辆-非线性包装系统耦合系统在路面脉冲激励下的隔振特性。**方法** 整体考虑路面-运载工具-缓冲包装材料-物品之间耦合的非线性振动传递模型, 建立基于二分之一系统的五自由度路面脉冲激励下车辆-非线性包装系统运动分析理论模型, 推导得到系统动力学方程并求解。依据结果比较考虑车辆-非线性包装系统耦合及不考虑两者耦合对运输包装件的影响, 从而得知考虑车辆-非线性包装件系统耦合系统下包装件最大竖向位移是不考虑两者耦合情况下的1.25倍左右, 并分别对隔振材料非线性因素及路面不平顺因素对包装件的影响进行分析。**结果** 在车辆运输过程中, 隔振材料的非线性因素及路面不平顺因素对包装件系统的响应会产生一定的影响。**结论** 对于精确进行被动隔振设计和隔振效果评价具有积极意义。

关键词: 非线性; 隔振; 耦合

中图分类号: TB485.3; O322

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0017-05

Dynamic Response of Transport Nonlinear Packaging Systems to Uneven Road Excitation

PENG Ting¹, XUE Fei², ZHOU Qiang¹

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the vibration isolation characteristics of transport vehicle-nonlinear packaging system coupled under pulsed excitation of the road. **Methods** Comprehensively considering the nonlinear vibration transfer model on the road-vehicles-cushioning packing material-goods coupled system, a 5-DOF motion analysis theoretical model based on a half system was established for the vehicle-nonlinear packaging system under pulsed excitation of the road, and dynamic equation was derived and solved. According to the results, the effects of considering and not considering the coupling of the vehicle-nonlinear packaging system were compared. It was found that the maximum vertical displacement of the package under the coupled system of vehicle-nonlinear packaging system was about 1.25 times as high as that of the system not considering the coupling, and the effects of nonlinear factors of isolation material and roughness of the road on the package were also analyzed. **Results** The nonlinear factors of isolation material and roughness of the road had some impact on the response of the package system during vehicle transport. **Conclusion** The results of this paper are very useful for the accurate design and effect analysis of vibration isolators.

KEY WORDS: nonlinear; vibration isolation; coupling

对于包装产品因冲击破坏所对应的力学模型,文献[1—6]研究了瓦楞纸板、蜂窝纸板、发泡聚乙烯等

缓冲系统冲击响应及设计方法。对在运输过程中因道路激励作用,包装件在真实路面振动载荷作用下的响应还未见报道。

文中综合考虑路面不平度与载货汽车情况,将运输车辆和运输包装件系统进行耦合,以路面随机激励为输入激励,用三次方多项式函数描述隔振材料的非线性刚度,建立了二分之一系统的五自由度^[7]道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学模型,仿真研究了其动力学响应特性。将文中所建立的运输车辆-非线性包装系统耦合系统与传统两者未耦合的包装系统响应进行对比,并分别考虑隔振材料的非线性因素和路面不平顺因素对运输包装产品的影响。

1 道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学模型

1.1 车辆运输非线性包装系统动力学模型

文中所分析的道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统采用二分之一的五自由度模型,见图 1。将车身视为具有集中质量的刚体,考虑车身垂直方向与俯仰振动。假设平顺性与操纵性之间无耦合关系,忽略汽车的操纵稳定性。轮胎与路面是点接触,且始终无跳起脱离接触,车辆以速度 v 在路面上匀速行驶^[8]。

图 1 中, m_{1H},m_{1R} 分别为前后车轮的簧下质量(kg); m_2 为车身质量(kg); m_3 为被隔振包装件的质量(kg); J 为簧上车身质量绕其质心的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); k_{1H},k_{1R} 分别为前后轮胎的垂直刚度(N/m); k_{2H},k_{2R} 分别为前后悬架的刚度(N/m); c_{1H},c_{1R} 分别为前后轮胎的平

均阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s/m}$); c_{2H},c_{2R} 分别为前后悬架减震器的平均阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s/m}$); c_3 为隔振材料的粘性阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s/m}$); y_{1H},y_{1R} 分别为前后轮受到垂直方向上的激励; x_{1H},x_{1R} 分别为前后轮在垂直方向上的位移(m); x_2 为车身质量在垂直方向上的位移(m); ψ 为车身的俯仰角位移(rad); x_3 为被隔振包装件竖向位移(m); L_1,L_2 分别为前后轮轴到簧上质量质心的水平距离(m); L_3 为被隔振包装件中心到簧上质量质心的水平距离(m)。

F 为恢复力, $F=k_3(x-y)+\beta(x-y)^2$,其中 k_3 为隔振材料的线性刚度参数, β 为隔振材料的非线性刚度参数。

1.2 道路不平顺激励模型

根据文献[9—10]的结果,车轮受到路面随机激励时域数学模型为:

$$\dot{Y}(t)=F_wY(t)+B_0W_1(t) \tag{1}$$

式中: $Y(t)=[y_{1H} \ y_{1R}]^T$, y_{1H},y_{1R} 分别代表前轮、后轮的路面输入; $W_1(t)$ 为白噪声(噪声功率为0.0001 dB); F_w 为状态参量, $F_w=\begin{bmatrix} -av & 0 \\ av+2/\Delta & -2/\Delta \end{bmatrix}$, a 为路面不平度的路面常数(见表 1), v 为车速, Δ 为后轮相对前轮激励的延迟时间, $\Delta=\frac{L_1+L_2}{v}$; B_0 为状态参量, $B_0=[1 \ -1]^T$ 。

表 1 路面参数估计^[9]

Tab.1 Parameter estimates table of pavement	
路面等级	a/m^{-1}
A	0.1320
B	0.1303
C	0.1200
D	0.1007
E	0.0900

1.3 系统动力学方程

根据 Lagrange 运动方程,道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学方程为:

$$M\ddot{X}+C\dot{X}+KX+F=H\dot{Y}+GY \tag{2}$$

式中: M 为质量矩阵,

$$M=\begin{bmatrix} m_{1H} & & & & \\ & m_{1R} & & & \\ & & m_2 & & \\ & & & J & \\ & & & & m_3 \end{bmatrix};$$

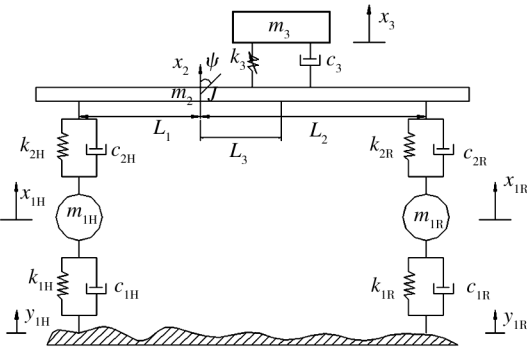


图 1 道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学模型
Fig.1 Dynamic model of transport nonlinear packaging systems under uneven road excitation

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C} \text{ 为阻尼矩阵, } \mathbf{C} = & \begin{bmatrix} c_{2H}+c_{1H} & 0 & -c_{2H} & c_{2H}L_1 & 0 \\ 0 & c_{2R}+c_{1R} & -c_{2R} & c_{2R}L_2 & 0 \\ -c_{2H} & -c_{2R} & c_{2H}+c_{2R}+c_3 & -c_{2H}L_1-c_{2R}L_2+c_3L_3 & -c_3 \\ c_{2H}L_1 & c_{2R}L_2 & -c_{2H}L_1-c_{2R}L_2+c_3L_3 & c_{2H}L_1^2+c_{2R}L_2^2+c_3L_3^2 & -c_3L_3 \\ 0 & 0 & -c_3 & -c_3L_3 & c_3 \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{K} \text{ 为刚度矩阵, } \mathbf{K} = & \begin{bmatrix} k_{2H}+k_{1H} & 0 & -k_{2H} & k_{2H}L_1 & 0 \\ 0 & k_{2R}+k_{1R} & -k_{2R} & k_{2R}L_2 & 0 \\ -k_{2H} & -k_{2R} & k_{2H}+k_{2R}+k_3 & -k_{2H}L_1-k_{2R}L_2+k_3L_3 & -k_3 \\ k_{2H}L_1 & k_{2R}L_2 & -k_{2H}L_1-k_{2R}L_2+k_3L_3 & k_{2H}L_1^2+k_{2R}L_2^2+k_3L_3^2 & -k_3L_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & -k_3L_3 & k_3 \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{F} = & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\beta(x_3-x_2-L_3\psi)^3 \\ -\beta(x_3-x_2-L_3\psi)^3L_3 \\ \beta(x_3-x_2-L_3\psi)^3 \end{bmatrix}; \mathbf{H} \text{ 为轮胎阻尼矩阵, } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} c_{1H} & 0 \\ 0 & c_{1R} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{G} \text{ 为轮胎刚度矩阵, } \mathbf{G} = \begin{bmatrix} k_{1H} & 0 \\ 0 & k_{1R} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};
 \end{aligned}$$

$\mathbf{X}$ 为路面响应, $\mathbf{X} = [x_{1H} \ x_{1R} \ x_2 \ \psi \ x_3]^T$;
 $\mathbf{Y}$ 为路面激励列向量, $\mathbf{Y} = [y_{1H} \ y_{1R}]^T$ 。

2 仿真分析

用 Matlab/simulink 对车辆从某路段一端驶向另一端引起的振动进行仿真研究。车辆参数参考文献[18]取值, $m_{1H} = 325 \text{ kg}$; $m_{1R} = 525 \text{ kg}$; $m_2 = 3400 \text{ kg}$; $m_3 = 8000 \text{ kg}$; $J = 11\ 970.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $k_{1H} = 9.6 \times 10^5 \text{ N/m}$; $k_{1R} = 1.92 \times 10^6 \text{ N/m}$; $k_{2H} = 1.7 \times 10^5 \text{ N/m}$; $k_{2R} = 4.8 \times 10^5 \text{ N/m}$; $c_{2H} = 1.4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; $c_{2R} = 7 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; $L_1 = 2.2 \text{ m}$; $L_2 = 4.3 \text{ m}$; $L_3 = 1.05 \text{ m}$ 。车辆轮胎参数参考文献[12]取值, $c_{1H} = 1000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; $c_{1R} = 1000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。运输包装件隔振材料参数参考文献[13]取值, $k_3 = 149\ 900 \text{ N/m}$, $\beta = 6.76 \times 10^{10} \text{ N/m}$, $c_3 = 96.207 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

2.1 与不考虑运输车辆-包装系统耦合作用时相比较

为了对车辆-非线性包装系统耦合系统的影响进行分析,对以下 2 种情况的分析结果进行对比。工况 1 为文中所建的车辆-非线性包装系统耦合模型,工况 2 为不考虑车辆-非线性包装系统耦合,把车身在垂直方向上的位移视为外界荷载,直接计算分析运输包装件响应。运输车辆以 72 km/h 的速度在 B 等级路况条件下匀速行驶。运输包装件在 2 种工况下的竖向位移响应见图 2。从图 2 可以看出,运输包装件

竖向位移呈现随机运动性,工况 1 的最大竖向位移是工况 2 的 1.25 倍左右。耦合运输车辆系统对运输包装件振动的影响非常明显,不考虑运输车辆-非线性包装系统耦合系统的响应分析计算,结果偏向不安全。下面分别对工况 1 下隔振材料的非线性因素和路面不平顺因素对运输包装件的影响进行详细讨论。

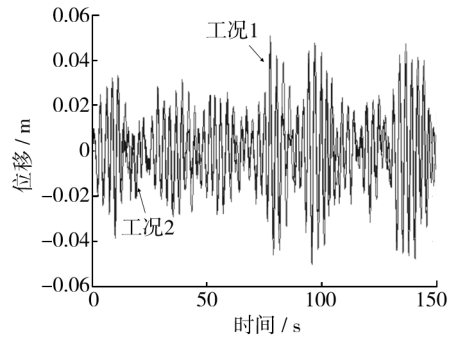


图 2 运输包装件竖向位移

Fig. 2 Vertical displacement of the transportation package

2.2 β/k_3 的影响

β/k_3 越大非线性程度越大, $\beta/k_3 = 0$ 表示忽略隔振材料非线性因素的线性化结果。运输车辆以 72 km/h 的速度匀速行驶在 B 等级路况条件下,忽略发泡聚乙烯隔振材料非线性刚度参数和考虑非线性刚度参数时包装运输件加速度功率谱见图 3。由图 3 可知,由于系统为多自由度系统,运输包装件出现分频现象,并且第 1 个峰值分布在 $2 \sim 3 \text{ Hz}$ 范围内,该结

果符合路面车辆运输包装产品振动情况^[14—15]。在 2 ~ 3 Hz 范围内,运输包装件响应考虑非线性参数与忽略非线性参数系统频率一致,但考虑非线性参数的幅值略微增大。在中频段,当 $\beta=6.76\times10^4$ N/m 时,相对 $\beta=0$ 没有明显变化;当 $\beta=6.76\times10^7$ N/m 时,幅值降低,频率不变;当 $\beta=6.76\times10^{10}$ N/m 时,幅值骤降,主频右移,并且频率范围扩大。

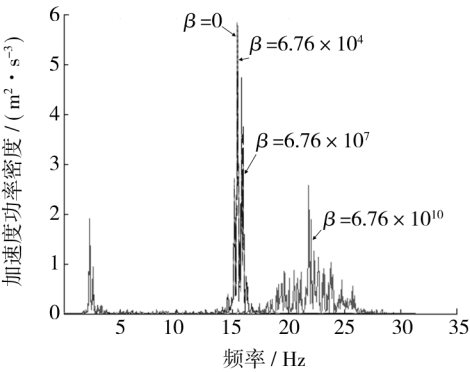


图3 非线性因素对运输包装件加速度功率谱的影响
Fig. 3 Effects of Nonlinear factors on the acceleration
PSD of the transport package

运输包装件竖向位移随隔振材料非线性因素的变化情况见图 4。从图 4 可以看出,当隔振材料的非线性程度较小时,运输包装件最大竖向位移随非线性因素的增加没有明显变化;当非线性程度继续增大时,运输包装件竖向最大位移随之减小。

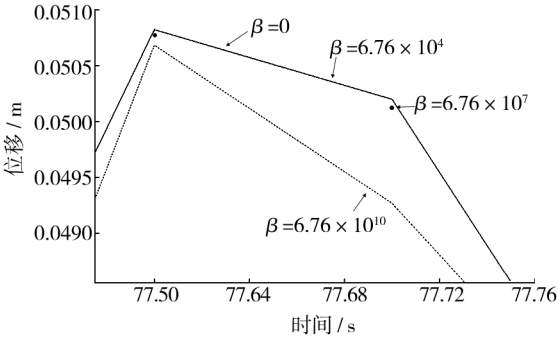


图4 非线性因素对运输包装件最大竖向位移的影响
Fig. 4 Effects of Nonlinear factors on the maximum
vertical displacement of the transport package

由此可知,在车辆运输过程中隔振材料非线性强度对运输包装产品的响应与系统频率及非线性强弱有关。在工程设计中,当系统频率为低频段时,由于隔振材料的非线性对系统的响应产生的影响不明显,所以为了提高计算效率将非线性隔振材料简化为线

性材料对隔振设计和隔振效果的评价影响不大;当系统处于中频段时,非线性因素对系统的响应产生以下 2 种情况:非线性强度较小时,即 $\beta/k_3<0.5$ 时,可以将隔振材料线性化,对系统的响应不会产生较大影响;当非线性强度较大时,隔振材料的非线性因素对运输包装件振动特性会产生较大影响,若忽略非线性因素,按照线性化设计理念对隔振设计和隔振效果评价会产生较大误差,甚至可能导致隔振设计的失败。

2.3 路面不平顺的影响

运输车辆以 72 km/h 的速度在 5 种等级路况条件下匀速行驶,运输包装件的最大加速功率谱见图 5,最大竖向位移见图 6。由图 5 可知,运输包装件的响应在 2 ~ 3 Hz 范围内,随路面不平顺幅值的增大,加速度功率谱幅值逐渐增大;在中频段加速度功率谱幅值变化规律呈现增大—减小—增大的趋势,主频频率先减小后增大。

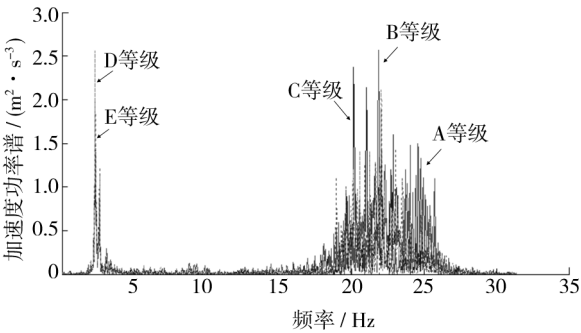


图5 路面不平顺对包装件加速度功率谱的影响
Fig. 5 Effects of uneven road on the acceleration
PSD of the transport package

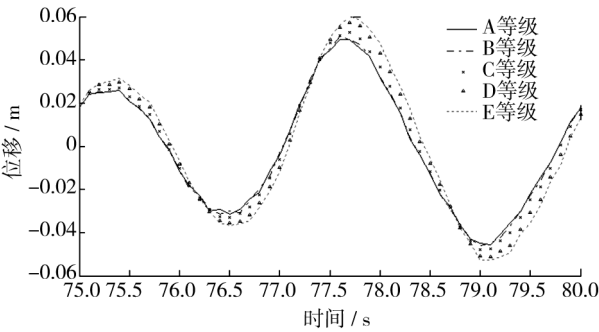


图6 路面不平顺对包装件最大竖向位移的影响
Fig. 6 Effects of uneven road on the maximum
vertical displacement of the package

从图 6 可以看出,相同条件下,运输包装件竖向

最大位移随着路面不平顺幅值增加而逐渐增大。

由此可知,运输包装件在车辆运输过程中的隔振设计要充分考虑路面不平顺的影响,否则隔振设计对包装件的隔振效果不能达到预期效果。

3 结语

建立了二分之一系统五自由度道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学模型及其动力学方程,应用 Matlab/simulink 仿真方法,分析比较了文中建立的考虑车辆-非线性运输包装系统耦合系统与不考虑两者耦合对运输包装产品的影响。结果表明,传统研究包装运输产品隔振响应,即不考虑车辆-非线性包装系统耦合对运输包装产品的响应分析结果偏向不安全。

同时分别讨论分析了隔振材料的非线性因素和路面不平顺因素,对道路不平顺激励下车辆运输-非线性包装系统耦合系统响应的影响。结果表明,在车辆运输过程中隔振材料的非线性因素和路面不平顺因素对运输包装产品的响应会产生一定影响。在工程设计中要充分考虑路面不平顺因素的影响,以及不能为了提高计算效率,刻意忽略非线性隔振材料的非线性因素,使其线性化,这样可能降低隔振效果,甚至导致隔振失败。文中的分析和结论为车辆运输包装产品进行隔振设计与隔振效果分析提供了必要的理论基础。

参考文献:

- [1] 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. Cushion Model and Its Application of C-flute Corrugated Paperboard[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(1):39—41.
- [2] 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):30—32.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-layer Corrugated Paperboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21):30—32.
- [3] 卢富德,陶伟明,高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(10):1773—1777.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10):1773—1777.
- [4] 卢富德,陶伟明,高德. 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),2012,46(8):1431—1436.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Compression Responses of Series Cushioning Structures by a Virtual Mass Method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8):1431—1436.
- [5] 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 Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):335—341.
- [6] 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 Analysis on Item Packaging System with Beam Type Elastic Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15):79—81.
- [7] 王波,殷学纲,陈伟民,等. 考虑人载的汽车多自由度3维动力学模型[J]. 应用力学学报,2006,23(1):57—61.
WANG Bo, YIN Xue-gang, CHEN Wei-min, et al. 3D Dynamic Model of Vehicle with Passengers[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1):57—61.
- [8] 张丙强,李亮. 车辆-路面耦合振动系统模型与仿真分析[J]. 振动与冲击,2010,29(2):35—38.
ZHANG Bing-qiang, LI Liang. Dynamic Model and Simulation of a Vehicle-road Coupled System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2):35—38.
- [9] 檀润华,陈鹰,路甬祥. 路面对汽车激励的时域模型建立及计算机仿真[J]. 中国公路学报,1998,11(3):96—102.
TAN Run-hua, CHEN Ying, LU Yong-xiang. The Mathematical Models in Time Domain for the Road Disturbances and the Simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(3):96—102.
- [10] 张永林,钟毅芳. 车辆路面不平度输入的随机激励时域模型[J]. 农业机械学报,2004,35(2):9—12.
ZHANG Yong-lin, ZHONG Yi-fang. Time Domain Model of Road Undulation Excitation to Vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(2):9—12.

- GB/T 12914—2008, Determination of Paper and Paperboard Tensile Strength[S].
- [7] GB/T 450—2008, 纸和纸板试样的采取及试样纵横向、正反面的测定[S].
- GB/T 450—2008, Determination of Taken and Vertical and Horizontal and the Positive and Negative of Paper and Paperboard Samples[S].
- [8] GB/T 1539—2007, 纸板耐破度的测定[S].
- GB/T 1539—2007, Determination of Bursting Strength of Paperboard[S].
- [9] GB/T 2679. 7—2005, 纸板戳穿强度的测定[S].
- GB/T 2679. 7—2005, Determination of Puncture Strength of Paperboard[S].
- [10] 郭彦峰, 许文才, 李小丽, 等. 包装测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- GUO Yan-feng, XU Wen-cai, LI Xiao-li, et al. Packaging Testing Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [11] GB/T 22364—2008, 纸和纸板弯曲挺度的测定[S].
- GB/T 22364—2008, Determination of the Bending Stiffness of Paper and Paperboard[S].
- [12] 王双飞, 谭程荣, 杨崎峰, 等. 制浆造纸实验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
- WANG Shuang-fei, TAN Cheng-rong, YANG Qi-feng, et al. The Experiment of Pulping and Papermaking[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [13] 李远华, 刘焕彬, 陶劲松, 等. 纸张抗张强度模型的研究进展[J]. 中国造纸, 2014, 33(1): 65—69.
- LI Yuan-hua, LIU Huan-bin, TAO Jin-song, et al. Research Progress of Paper Tensile Strength Models[J]. China Pulp & Paper, 2014, 33(1): 65—69.
- [14] 王颖. 卷烟纸抗张强度的影响因素[J]. 华东纸业, 2013, 44(5): 26—28.
- WANG Ying. The Influence Factors of Cigarette Paper Tensile Strength[J]. East China Pulp & Paper Industry, 2013, 44(5): 26—28.
- [15] 李林明. 提高箱纸板耐破度的几种措施[J]. 造纸科学与技术, 2006, 25(1): 52.
- LI Lin-ming. Several Measures to Improve the Bursting of Cardboard Boxes[J]. Paper Science & Technology, 2006, 25(1): 52.
- [16] 牛淑梅, 康莉. 瓦楞纸板戳穿强度与耐破强度相关性的探讨[J]. 中国包装工业, 2001(3): 33—34.
- NIU Shu-mei, KANG Li. Investigate the Correlation of Puncture Strength and Burst Strength of Corrugated Board[J]. China Packaging Industry, 2001(3): 33—34.
- [17] 张晓春, 朱芋锭, 姚迟强, 等. 热压压力及板材密度对竹木复合层积材顺纹抗压强度的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2012, 31(3): 23—27.
- ZHANG Xiao-chun, ZHU Yu-ding, YAO Chi-qiang, et al. Influence of Hot-pressing Press and Board Density on Compressive Strength of Bamboo-wood Composite Laminated Veneer Lumber[J]. Journal of Bamboo Research, 2012, 31(3): 23—27.
- [18] 任怀燕, 赵传山. 改进纸和纸板挺度的助剂[J]. 造纸化学品, 2008, 20(2): 29—31.
- REN Huai-yan, ZHAO Chuan-shan. Stiffness Additives of Paper and Paperboard[J]. Paper Chemicals, 2008, 20(2): 29—31.
- [19] 唐爱民, 贾超锋, 王鑫. 热压工艺对对位芳纶纸强度性能的影响[J]. 造纸科学与技术, 2010, 29(6): 61—64.
- TANG Ai-min, JIA Chao-feng, WANG Xin. Effect of Hot Pressing on Strength Properties of PPTA Paper[J]. Paper Science & Technology, 2010, 29(6): 61—64.
- (上接第 21 页)
- [11] 胡红元. 货物捆绑包装运输系统动力学仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- HU Hong-yuan. Dynamic Simulation of Truck-product Transport Package System[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [12] 葛剑敏, 刘春辉, 郑联珠. 轮胎垂直滚动动态刚度和阻尼的研究[J]. 轮胎工业, 2000(12): 707—709.
- GE Jian-min, LIU Chun-hui, ZHENG Lian-zhu. Study on Vertical Dynamic Stiffness and Damp of Running Tire[J]. Tire Industry, 2000(12): 707—709.
- [13] 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.
- LU Fu-de, ZHANG Shao-yun, DU Qi-xiang. Study of Vibration Isolation Performance of EPE[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 1—4.
- [14] VINCENT R, MICHAEL S. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics[J]. Packaging Technology and Science, 2013(26): 82—95.
- [15] 沈黎明, 张华良, 顾祖莉. 运输包装件振动试验系统研究[J]. 中国测试技术, 2005, 31(6): 87—89.
- SHEN Li-ming, ZAHNG Hua-liang, GU Zu-li. Research on the Vibration Test System of Transport Package[J]. China Measurement Technology, 2005, 31(6): 87—89.