

# 火工品包装箱抗震性能的线性动力学分析

李霄, 左莉, 陈显波, 袁伟

(第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

**摘要:** 通过静力学分析, 忽略接触摩擦, 将火工品包装箱的抗震性能分析转化为线性动力学问题, 建立了有限元模型并分析模态, 得到了前 20 阶振动频率, 在此基础上对包装箱进行了随机振动和水平冲击测试。该方法对优化火工品包装箱设计以提高箱体结构的抗震性能, 具有实际意义。

**关键词:** 抗震性能; 火工品包装箱; 线性动力学; 有限元模型

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)11-0063-05

## Dynamics Analysis on Vibration Resistance of Packing Case of Initiating Explosive Device

Li Xiao, ZUO Li, CHEN Xian-bo, YUAN Wei

(The Second Artillery Equipment Academe, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The vibration resistance analysis on packing case of Initiating Explosive Device (IED) was transformed into linear dynamic issues by using static analysis and ignoring the contact friction. The finite element model was consequently established. Front 20 orders vibration frequencies were obtained. Packing case of IED was tested by random vibration test and horizontal impact test. The method can be applied to optimize the design of packing case of IED to improve vibration resistance.

**Key words:** vibration resistance; packing case of IED; linear dynamics analysis; finite element model

火工品多采用包装箱进行贮存和运输, 包装设备的抗震性能直接关系到火工品的安全。为验证火工品包装箱的抗震性能, 找准抗震薄弱环节, 提出改进技术措施提升抗震能力, 对火工品包装箱的抗震性能进行研究十分必要。

包装箱的抗震性能分析是一个较为复杂的问题, 不仅要考虑包装箱本身的结构特点和材料特性, 还要兼顾包装箱内部产品的固定方式及其与包装箱之间的相互作用。因此, 不能通过直接建立数学模型求解传递函数, 进而得出作用结果的方式来进行计算。如果通过引入有限元方法, 并将有限元分析与试验相结合, 这将大大简化理论分析<sup>[1]</sup>, 从而逼近真实结果, 不失为一种可行的方法。

### 1 动力学分析

对包装箱在随机振动和水平冲击作用下的性能

分析, 当忽略复杂接触条件时, 均可看作是线性动力学分析问题, 其运动的结构矩阵方程可表达如下<sup>[2]</sup>:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别代表质量、阻尼和刚度矩阵;  $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ ,  $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ ,  $\{\mathbf{u}\}$  和  $\{\mathbf{F}(t)\}$  分别代表节点加速度、速度、位移和与时间相关的力。当这个有限元模型由大量自由度数量  $n$  (有限元网格节点处的位移未知) 表示时, 式(1)的矩阵具有很大规模, 问题的求解可能需要占用相当多的计算资源和时间。

在这个线性动态分析中, 可使用模态分析的方法进行求解。通过使用这种方法, 可以使耦合了  $n$  个运动方程组的复杂系统简化为  $m$  个独立的运动方程, 它们具有以下形式:

$$\ddot{x}_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 + \Delta_1^2 x_1 = r_1(t) \quad (2)$$

其中,  $\lambda_1$  和  $\Delta_1^2$  为特定的常数;  $m$  代表使用频率分析计算得到的内在自然模式数量。式(2)对应着模式 1。对  $m$  个解耦的方程组进行求解速度会快很多,

而且复杂程度也大大降低,其组合也提供了最初有限元模型的位移。模态分析需要自然频率和振动模式,因此需要对模型进行频率分析。

## 2 分析算例

选取某型火工品包装箱分别进行随机振动测试和水平冲击测试。首先通过静力学方法,分析将上述测试转化为线性动力学问题的可行性。然后,在可以忽略接触的条件下,使用基于模态的线性动力学方法进行有限元分析,计算时重力加速度均取  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。文献[3]使用 Pro/Mechanica 软件对印版滚筒体进行模态分析,得到了前 2 阶的固有频率,使用 SolidWorks 软件进行建模,直接通过其 Simulation 模块进行仿真计算。

### 2.1 包装箱结构

包装箱整体分为上箱体和下箱体两部分,采用 8 个 M8 螺栓扣紧。上箱体采用铝合金制作,壁内填 PE 材料,主要起到保温、隔湿和一定的抗压作用。下箱体分为下箱座和紧固装置两部分。其中,底座为支撑件,为紧固装置提供固定平台;紧固装置对小箱体起到直接固定作用,是整个包装箱的关键部件,其结构组成见图 1。其中,核心产品放置于小箱体内,压板、

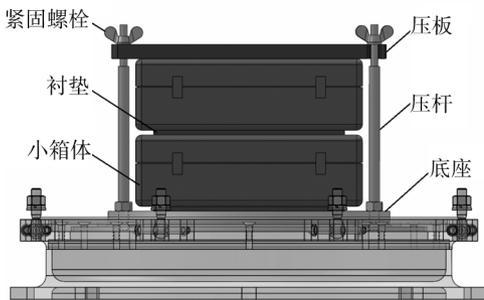


图 1 紧固装置结构组成

Fig. 1 Structure of the fastening device

底座均采用铝合金 2014,衬垫为橡胶材料,压杆采用 45 号钢材,压杆与底座采用 M8 螺纹连接,压杆与压板由 M5 紧固螺栓压紧。

### 2.2 作用力分析

由包装箱结构可以看出,紧固装置是整个设备的关键部件,直接关系到小箱体的安全,因此可将紧固装置作为受力对象进行分析,分为两个方面:一是压杆与压板结构能否提供足够的预紧力,使得小箱体在

任何情况下不出现滑动;二是压杆结构是否具备足够的强度,使得在任何情况下不出现较大变形或断裂,造成整个结构失效。

#### 2.2.1 地震作用力分析

地震作用即为水平与垂直方向的随机振动,其平均振动频率小于  $2 \text{ Hz}$ 。一般取水平加速度峰值  $a_h$  作为参考标准,垂直加速度  $a_v$  为水平加速度的  $0.65$  倍。根据实际情况,取  $a_h = 0.5g$ ,则  $a_v = 0.325g$ 。由于地震作用频率较低,对于紧固装置而言,可以将振动作用看作是水平和垂直方向的随机振动响应。下面从静力学角度对压板预紧力及压杆受力进行分析,为有限元计算提供输入边界条件。

将两个小箱体、压板作为整体考虑,其水平方向受力见图 2。

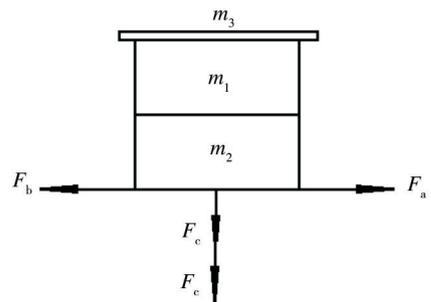


图 2 摩擦力分析

Fig. 2 Fiction analysis diagram

图 2 中,整体重力  $F_c = (m_1 + m_2 + m_3)g$ ,  $m_1, m_2, m_3$  分别为两个小箱体及压杆的质量;  $F_d$  为紧固螺栓施加的预紧力,则整体产生的摩擦力为  $F_b = \mu(F_c + F_d)$ ; 峰值加速度产生的惯性力为  $F_a = (m_1 + m_2 + m_3)a_h$ 。当  $F_b > F_a$  时,整体将不会滑动。参考机械设计手册,取摩擦系数  $\mu = 0.3$ ,则可求得两个 M5 螺栓最大预紧合力为  $F_d = 2F_M \mu_0 = 2.34 \text{ kN}$ ,带入可求得摩擦力为  $F_b = 0.7 \text{ kN}$ ,求得的惯性力为  $F_a = 0.08 \text{ kN}$ ,可见  $F_b \gg F_a$ ,振动情况下不会发生相对滑动。在垂直方向上,由于螺栓的紧固作用,在  $0.325g$  加速度作用下,易见小箱体将不会发生相对位移。

因此,在有限元计算时可将 2 个小箱体与压板、底座之间的接触看作是刚性连接,从而将问题转化为线性动力学分析。

#### 2.2.2 冲击作用力分析

根据实际运输情况,设定紧急制动情况下的平均加速度为  $a_{mid} = 0.8g$ 。因此,水平冲击作用可看作是平均加速度为  $a_{mid}$  的瞬态冲击响应。其作用力分析

与地震作用力分析一致。

### 2.3 有限元分析计算

首先,孤立出紧固装置结构,并对模型进行必要简化,去除不影响受力计算的特征。在此基础上对模型进行网格划分,设定单元格整体大小为 9 mm,以保留主要的结构特征。网格化后的紧固装置见图 3。

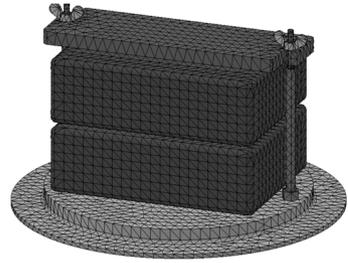


图3 网格化的紧固装置

Fig.3 Grid of the fastening device

定义各部分材料,见表 1。

表 1 各部件材料参数

Tab.1 Material parameters of components

序号	部件名称	材料名称	泊松比	屈服强度/(N·m <sup>-2</sup> )	弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )
1	压板	铝合金 2014	0.330	96 509 800	7.30e+10
2	压杆	钢材 1045	0.290	530 000 000	2.05e+11
3	螺栓	钢材 1045	0.290	530 000 000	2.05e+11
4	底座	铝合金 2014	0.330	96 509 800	7.30e+10
5	垫片	橡胶	0.490	9 237 370	6 100 000
6	小箱体	PE 低中密度(以内填物为主)	0.439	—	172 000 000

#### 2.3.1 地震受力计算

定义地震输入条件,参照《规范》<sup>[4]</sup> 设定的地震反应谱,按照文献[5]的数值方法计算出对应《规范》多遇地震、设防烈度 7 度、场地类别 II、设计地震第一组、阻尼比 0.05 的反应谱当量加速度功率谱密度曲线(PSD 曲线),见图 4。在计算中,取振动频率范围 0

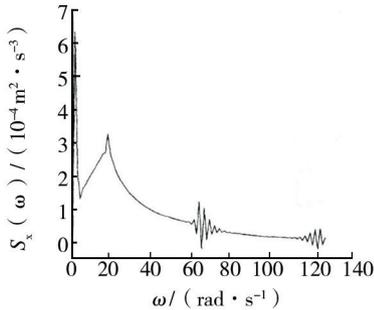


图 4 输入 PSD 曲线<sup>[4]</sup>

Fig.4 The input PSD curve

~120 rad/s。

对该曲线进行必要简化,保留典型时间点(0, 2, 5, 20, 40, 120 rad/s)和其对应加速度值(0, 0.000 65, 0.000 14, 0.000 33, 0.000 1, 0.000 04 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)构成分段曲线,见图 5。对结构进行模态分析,得到前 20 阶振动频率(自然频率),见表 2。

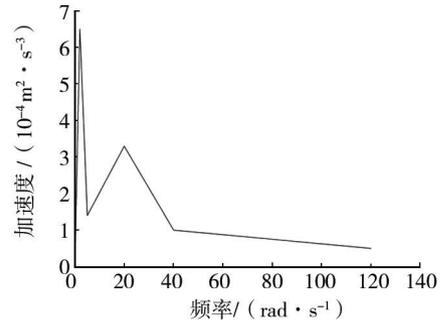


图 5 简化后 PSD 曲线

Fig.5 Reduced PSD curve

表 2 模态分析结果

Tab.2 Result of modal analysis

模式	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	103.71	105.72	166.49	324.94	366.43	417.89	435.42	461.47	547.94	629.08
周期/s	0.009 643	0.009 459	0.006 006	0.003 078	0.002 729	0.002 393	0.002 297	0.002 167	0.001 825	0.001 59
模式	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
频率/Hz	699.65	780.6	803.68	908.27	952.21	960	1075.9	1124.9	1133.3	1143.4
周期/s	0.001 429	0.001 281	0.001 244	0.001 101	0.001 05	0.001 042	0.000 929	0.000 889	0.000 882	0.000 875

模拟地震情况,在水平和垂直方向上分别设定统一激励,其中垂直方向激励幅值为水平方向的 0.65 倍。计算得到应力分布云图见图 6,位移分布云图见图 7,速度分布云图见图 8,加速度分布云图见图 9。

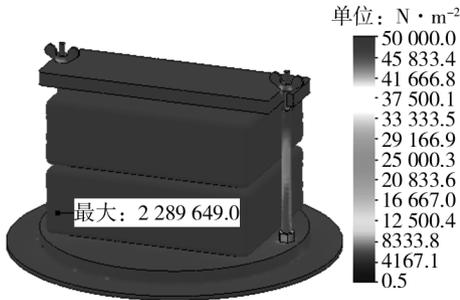


图 6 振动响应应力分布云图

Fig. 6 Stress nephogram of vibration response

图 7,速度分布云图见图 8,加速度分布云图见图 9。

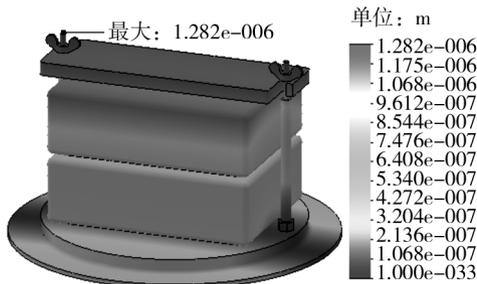


图 7 振动响应位移分布云图

Fig. 7 Displacement nephogram of vibration response

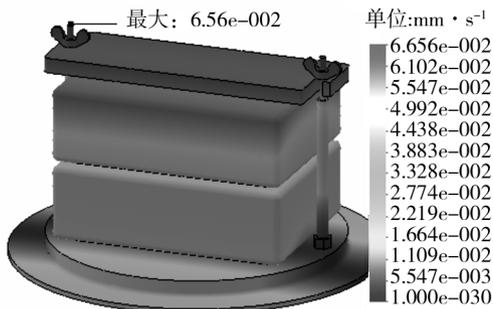


图 8 振动响应速度分布云图

Fig. 8 Velocity nephogram of vibration response

可见,最大应力值为  $2\,289\,649.0\text{ N/m}^2$ ,小于压杆的屈服强度;最大合位移出现在压杆顶端,为  $1.282 \times 10^{-6}\text{ m}$ ,基本没有形变;最大速度出现在压杆顶端,为  $6.656 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ ,最大加速度出现在上部小箱体上侧,为  $0.067\,74\text{ g}$ 。

分别选取压杆与压板、底座连接点附近节点探测加速度数据,其节点响应数据曲线见图 10;分别选取

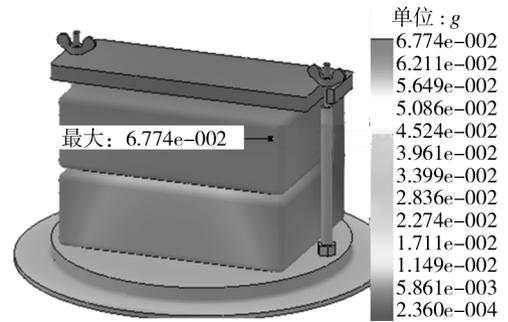


图 9 振动响应加速度分布云图

Fig. 9 Acceleration nephogram of vibration response

压杆顶部、压板上侧边缘和上部小箱体顶部边缘节点探测合位移数据,其节点响应数据曲线见图 11。

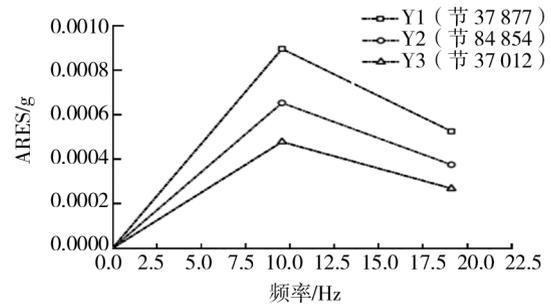


图 10 加速度探测数据曲线

Fig. 10 Curves of acceleration detection data

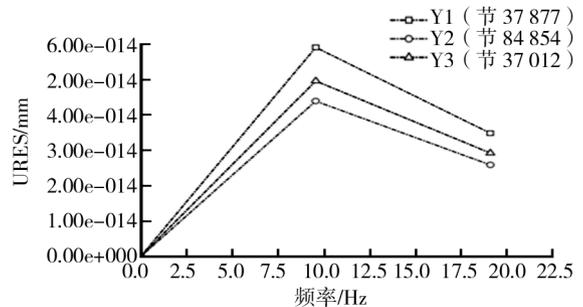


图 11 位移探测数据曲线

Fig. 11 Curves of acceleration detection data

可见,在  $9.5\text{ Hz}$  附近出现加速度和位移极值,结构的共振频率应避免出现在该值附近。

### 2.3.2 冲击受力计算

定义冲击平均加速度为  $a_{mid} = 0.8\text{ g}$ 。采用典型脉冲函数,参照标准<sup>[5]</sup>有关冲击试验参数设定冲击时间为  $22\text{ ms}$ ,时间步长为  $5 \times 10^{-5}\text{ s}$ ,以达到足够的载荷时间分辨率。冲击输入脉冲曲线定义如下式。

$$\begin{cases} y = \frac{1000}{11}x & 0 \leq x < 0.011 \\ y = 0 & 0.011 \leq x \leq 0.022 \end{cases} \quad (3)$$

计算可得应力分布云图如图 12 所示,合位移分布云图见图 13。可以看出,最大应力为 4 739 019.0

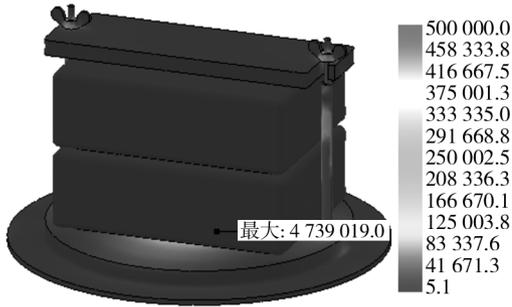


图 12 冲击响应力分布云图

Fig. 12 Stress nephogram of impact response

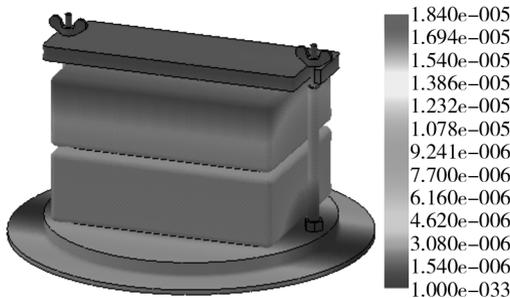


图 13 冲击响应位移分布云图

Fig. 13 Displacement nephogram of impact response

$\text{N}/\text{m}^2$ , 小于材料的屈服强度,最大位移为  $1.848 \times 10^{-5}$  m,基本没有变形。

分别选取压杆与压板、底座连接附近节点进行应力数据探测,其响应数据曲线分别见图 14;分别选取

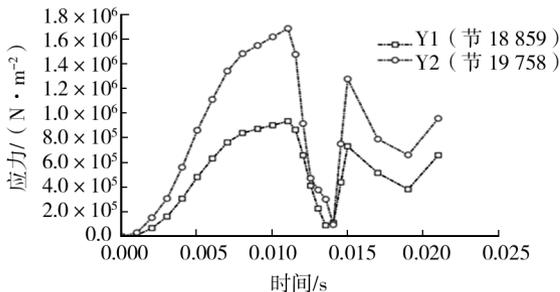


图 14 应力探测数据曲线

Fig. 14 Curves of stress detection data

压杆顶部、压板上侧边缘和上部小箱体顶部边缘节点探测合位移数据,其响应数据曲线见图 15。

可见,由于设定全局阻尼系数较小(0.025),在冲击后(0.011 s 之后)数据响应出现振荡现象。

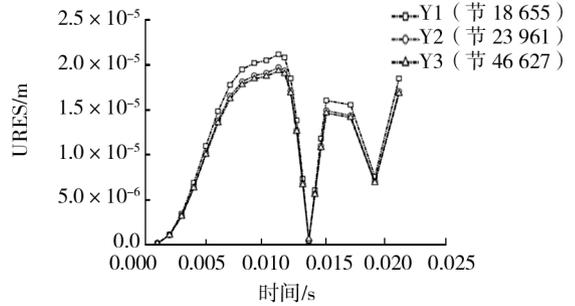


图 15 位移探测数据曲线

Fig. 15 Curves of displacement detection data

### 2.3.3 抗震改进需求分析

通过上述计算可以看出,紧固装置本身的结构及强度具备抗击随机振动和水平冲击的能力,小箱体在该结构的紧固下是安全的,但仍存在如下两点隐患:一是垂直方向的振动没有进行详细计算,当材料出现疲劳特性时,在短时间的反复震荡下可能出现螺栓松动,降低预紧力的同时造成小箱体与底座、小箱体之间的摩擦力减小,从而发生滑动现象;二是由于压板与压杆之间没有采用孔洞穿插,在剧烈冲击时螺栓自身可能出现沿加速度方向的滑动,这不仅会在瞬间加大压杆所承受的剪切力,造成弯折,同时也将破坏紧固装置的固有形态,造成紧固失效。

综上所述,在抗震改进中,可将改进压板结构及增加双向紧固螺栓作为重点措施加以研究。

## 3 结语

利用有限元方法对火工品包装箱的抗震性能进行了分析,将原本复杂的问题转化为通过有限个解耦的线性求解过程逼近原问题的近似解,不仅计算精度高,而且能够适应各种复杂的形状,是一种较为有效的工程分析手段。在下一步的工作中,还可将计算中忽略的接触问题重新考虑进去,进行非线性动力学分析,这将进一步求得接近真实情况的解。

### 参考文献:

- [1] 李厚民. 蜂窝纸板受压时的有限元分析[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 34-36.
- LI Hou-min. FEM Analysis of the Compression Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 34-36.

时纠正曝光时间。并且要综合考虑曝光时间和曝光能量的匹配,一方面使网点更好地被还原,另一方面将网点的扩大控制在较小的范围之内<sup>[10]</sup>,做到制版时既省时又能提高效率。

### 参考文献:

- [1] 黄蓓青,金杨,王德本,等. 彩色柔性版色彩阶调再现性[J]. 包装工程,2006,27(6):9-11  
HUANG Pei-qing, JIN Yang, WANG De-ben. Tones and Color Reproduction of Color Flexography[J]. Packaging Engineering,2006,27(6):9-11.
- [1] 张岩,刘士伟,李玉山. 柔印制版质量数字化控制方法的研究[J]. 包装工程,2012,33(3):99-103.  
ZHANG Yan, LIU Shi-wei, LI Yu-shan. Study of Digital Quality Control Method of Plate Making of Flexographic Printing[J]. Packaging Engineering,2012,33(3):99-103.
- [3] 吴丽. 柔性版印刷加网技术研究[J]. 包装工程,2007,28(5):177-184.  
WU Li. Research on Screening Technology of Flexographic Printing[J]. Packaging Engineering,2007,28(5):177-184.
- [4] 孟维华. 主曝光时间对热显影数字柔印版参数影响的微观研究[J]. 中国印刷与包装研究,2009,6(1):71-73.  
MENG Wei-hua. Microscopic Studies of the Influence of Main Exposure Time on Parameters of Flexographic Printing Plate Produced by Digital Thermal Method[J]. China Printing and Packaging Study,2009,6(1):71-73.
- [5] 金银河,李新胜. 柔性版印刷技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.  
JIN Yin-he, LI Xin-sheng. Flexographic Technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.
- [6] SAKAGUCHI Y, KAWAHARA K, YAMADA T. Diffusion of Unreacted Monomers Detected by ATR FTIR Spectroscopy in a Photo Sensitive Printing Plate After Photo reaction[J]. Journal of Applied Polymer Science,2004,92:2903-2907.
- [7] LIU X, GUTHRIE J T, BRYANT C. A Study of the Processing of Flexographic Solid-sheet Photopolymer Printing Plates[J]. Surface Coatings International,2002,85(4):313-319.
- [8] 郑美琴. 不同承印材料柔性版印刷网点扩大规律研究[J]. 包装工程,2009,30(9):107-110.  
ZHENG Mei-qin. Study of Dot Gain of Flexography on Different Substrates[J]. Packaging Engineering,2009,30(9):107-110.
- [9] 黄颖为. 柔版印刷中网点增大变形的研究[J]. 包装工程,2005,26(6):233-234.  
HUANG Ying-wei. Research of Dot Enlargement Deformation in Flexography[J]. Packaging Engineering,2005,26(6):233-234.
- [10] 安君,唐正宁,车永华. 柔性版印刷网点增大的分析[J]. 包装工程,2006,27(4):146-148.  
AN Jun, TANG Zheng-ning, CHE Yong-hua. Analysis of Dot Gain Problem in Flexography Printing[J]. Packaging Engineering,2006,27(4):146-148.
- [2] DS SolidWorks 公司. SolidWorks Simulation Premium 振动分析教程[M]. 北京:机械工业出版社,2010.  
DS SolidWorks. SolidWorks Simulation Premium Vibration Analysis Tutorial[M]. Beijing:China Machine Press,2005.
- [3] 王川. 基于 Pro/Mechnica 的印刷版滚筒体有限元模态分析[J]. 包装工程,2012(8):72-74.  
WANG Chuan. Finite Element Modality Analysis of Cylinder Body Based on Pro/Mechnica[J]. Packaging Engineering,2012,33(8):72-74.
- [4] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [5] 丁阳,张笈玮,李忠献. 对应地震反应谱的当量功率谱密度函数的数值算法[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):148-153.  
DING Yang, ZHANG Ji-wei, LI Zhong-xian. A Numerical Algorithm for Equivalent Power Spectral Density Functions Corresponding to Seismic Response Spectra[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2008,28(6):148-153.
- [6] GJB 150.18A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 冲击试验[S].  
GJB 150.18A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel. Part 18: Shock Test[S].

(上接第 67 页)