

小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能研究

张秀梅¹, 徐伟民², 张衡³

(1. 武昌工学院, 武汉 430065; 2. 武汉轻工大学, 武汉 430023;
3. 北京铁道工程机电技术研究所集团公司, 武汉 430000)

摘要: **目的** 研究小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能。 **方法** 分别对小麦秸秆缓冲包装材料进行静态压缩、松弛蠕变以及动态压缩试验, 采用L-M非线性拟合法曲线以及遗传算法识别模型参数。 **结果** 得到静态性能曲线和动态性能曲线, 以此建立小麦秸秆缓冲包装材料的力学模型。 **结论** 小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能曲线开口向上, 呈凹谷状, 且只有一个极值点, 具有明显的非线性及粘性特征。动态缓冲特性曲线近似呈U型, 过了最低点后, 曲线急速上升, 反映材料被压实。

关键词: 小麦秸秆; 缓冲包装材料; 力学性能

中图分类号: TB484.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0026-05

Mechanical Properties of Wheat Straw Cushioning Packaging Material

ZHANG Xiu-mei¹, XU Wei-min², ZHANG Heng³

(1. Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, China; 2. Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
3. Beijing Railway Institute of Mechanical and Electrical Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the mechanical properties of wheat straw cushioning packaging material. Static compression, creep and relaxation as well as dynamic compression for wheat straw cushioning packaging material were tested. The nonlinear fitting method of L-M and genetic algorithm were used to recognize the model parameters. The static performance curves and dynamic performance curves were obtained, and the mechanical model was established for the wheat straw cushioning packaging material. The mechanical performance curve of wheat straw cushioning packaging material showed an upward opening and a valley shape, with only one extreme point. Besides, it had obvious non-linear and viscous characteristics. The dynamic cushioning characteristic curve had an approximate U-shape, and the curve increased sharply after the minimum value, showing the compression of the material.

KEY WORDS: wheat straw; cushioning packaging material; mechanical performance

目前,在各种电子产品、家用电器、玻璃器皿、机械产品和仪器仪表等的缓冲包装上,主要采用泡沫塑料为缓冲材料。泡沫塑料虽具有密度小、质量轻、制作方便、缓冲性能好等优点,但不能自然降解,回收处理困难,是危害环境的“白色污染”源之一。农作物秸秆缓冲包装材料是一类可自然降解的缓冲包装材料,对其的开发研究可以保护人类赖以生存的环境,并实现可持续发展^[1]。这类材料具有良好的生物降解性和环境友好性^[2],可作为泡沫缓冲材料的替代品^[3]。在开发研制该材料时以泡沫缓冲材料为依据,其性能应与泡沫缓冲材料接近或更好,以便在包装行业中推广。环境问题是当今世界面临的重要问题,随着白色污染

的日趋严重,以农作物秸秆等天然可降解材料生产的缓冲包装材料,不仅无污染、易分解,而且来源丰富、价格便宜^[4]。随着科技的进步,现有不可再生资源的日益枯竭和人类环保意识的不断加强,用环保可再生的植物纤维制作发泡材料,以替代现有EPS塑料发泡材料和用纸浆制作的塑料发泡材料^[5-6]。产品在运输过程中,缓冲材料的性能对包装的保护作用影响巨大^[7],但是对农作物秸秆这类缓冲包装材料性能的研究还存在不足^[8]。

利用缓冲特性曲线分析材料的缓冲性能是最基本、最常用的方法,很多学者利用缓冲曲线进行了缓冲材料的性能分析研究^[9-13]。文中通过对小麦秸秆缓

收稿日期: 2014-11-09

作者简介: 张秀梅(1980—),女,湖北大悟人,硕士,武昌工学院讲师,主要研究方向为机械设计及理论、缓冲包装动力学。

冲包装材料进行静态和动态压缩试验,测试其缓冲曲线来分析其力学性能,并建立力学模型。

1 静态力学性能

1.1 静态压缩试验

1.1.1 材料与方法

试验材料是由西安建筑科技大学环保材料研究所周谋志教授提供的小麦秸秆缓冲包装材料,其密度为 0.2892 g/cm^3 ,小麦秸秆缓冲包装材料截面为正四边形,尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,见图1。选取5个试样,采用西安力创材料检测技术有限公司WDW-5型微机控制电子万能试验机,对所选择的试样进行静态压缩试验。

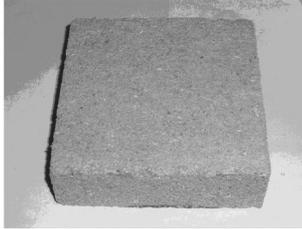


图1 小麦秸秆缓冲包装材料

Fig.1 Wheat straw cushioning packaging material

按照GB 8168—94《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[14]中规定的A法,对所选用的试样进行静态压缩试验。所谓“静态”是指在材料压缩试验机上对试样加压的速度很低(国标规定通常为 12 mm/min 以下即为静态),该试验设定速度为 2 mm/min ,接近于静态载荷。

1.1.2 静态压缩特征曲线

试验计算得出的应变 $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 对应的应力分别为 $0, 0.0538, 0.199, 0.547, 0.844, 1.24, 1.95, 3.56, 7.6 \text{ MPa}$ 。将试验得到的数据绘制小麦秸秆缓冲包装材料的应力-应变曲线见图2。从图2可以看出,小麦秸秆缓冲包装材料的静态应力-应变曲线不规则,曲线中有部分类似正切型,部分类似双曲正切型,是一个复杂的组合模型。由此,采用正切加双曲正切函数来拟合小麦秸秆缓冲包装材料的静态应力-应变关系,建立其静态力学模型:

$$\sigma = a_3 \tanh^3(a_1 \varepsilon) + a_4 \tan(a_2 \varepsilon) + a_5 \tan^3(a_2 \varepsilon) \quad (1)$$

该模型包含5个未知参数 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ,通过Matlab软件中非线性拟合法中的L-M法进行数据拟合。L-M法采用目标函数的二阶微分和一个方向矢量

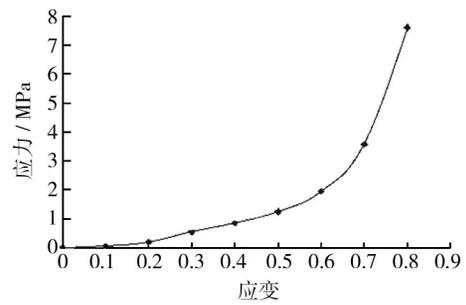


图2 应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve

不断调整计算的收敛方向,可以获得更好的收敛性^[15]。Matlab工具箱中的曲线拟合工具含有L-M法,在Matlab工具箱中调用L-M法拟合曲线见图3,利用试验数据拟合得到参数 $a_1=3.596, a_2=1.331, a_3=0.911 \text{ MPa}, a_4=-0.192 \text{ MPa}, a_5=1.196 \text{ MPa}$ 。

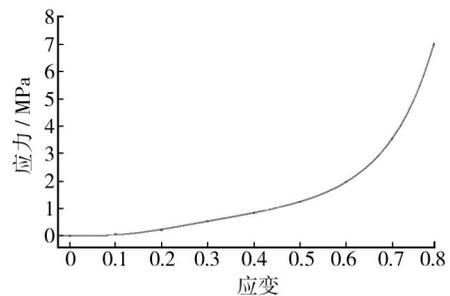


图3 试验数据拟合应力-应变曲线

Fig.3 Fitting of test data with stress-strain curve

1.2 静态应力松弛蠕变试验

1.2.1 材料与方法

试验材料采用西安建筑科技大学环保材料研究所周谋志教授提供的小麦秸秆缓冲包装材料,其密度为 0.24 g/cm^3 。试验样品取上下底面积为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、厚度为 25 mm 的直方体。采用西安力创材料检测技术有限公司WDW-5型微机控制电子万能试验机,对所选的样品分别进行应力松弛和蠕变试验^[16]。应力松弛试验根据试样厚度(25 mm)设置最大压缩位移为 7.5 mm ($\varepsilon_0=0.3$),试验速度为 0.01 mm/min 。根据设定参数自动结束试验,并自动记录压缩位移达到 7.5 mm 过程中的应力值,保存试验数据。

蠕变试验依据GB/T 14745—93《包装缓冲材料蠕变特性试验方法》,测量试验结束卸载后 $30 \text{ s}, 30 \text{ min}, 24 \text{ h}$ 时样品的厚度,并作为恢复厚度 T_{r1}, T_{r2}, T_{r3} 。

蠕变计算公式为:

$$\varepsilon_c = (T - T_0) \times 100\% / T \quad (2)$$

式中： ε_0 为蠕变； T_d 为在规定的时间内试验样品的厚度(mm)； T 为预处理后试验样品的厚度(mm)。

试验结束30 s, 30 min 和24 h后, 试样的厚度分别为 $T_{t1}=21.6$ mm, $T_{t2}=24.2$ mm, $T_{t3}=24.68$ mm。根据蠕变计算公式得到30 s时材料的蠕变为86.4%, 30 min时材料的蠕变为96.8%, 24 h时材料的蠕变为99.72%。

1.2.2 应力松弛蠕变试验特征曲线

1.2.2.1 应力松弛试验特征曲线

采用高斯方法, 应用Matlab软件对应力松弛试验数据进行曲线拟合, 拟合函数为:

$$\sigma = d_1 \exp(-((t-b_1)/c_1)^2) + d_2 \exp(-((t-b_2)/c_2)^2) + d_3 \exp(-((t-b_3)/c_3)^2) + d_4 \exp(-((t-b_4)/c_4)^2) \quad (3)$$

试验数据和拟合曲线见图4, 拟合得到 d_1, d_2, d_3, d_4 分别为18 000, 6363, 5546, 3136 N/cm², $b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4$ 分别为15.97, 114.6, 1678, 8.3, 9.3, 82.9, 1246, 1.2×10^7 s, 该拟合曲线的精确度为95%。由式(3)可以看出, 当时间 t 足够长时, 应力将趋近于0, 因此小麦秸秆缓冲包装材料存在粘性流动, 具有粘性。

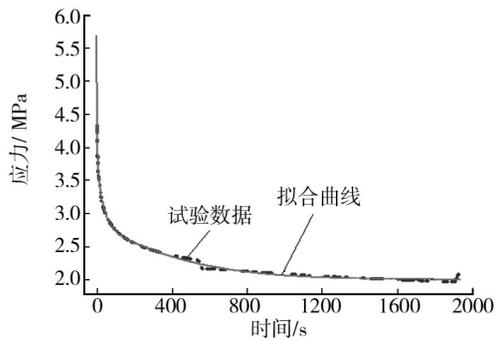


图4 形状函数与原试验数据的应力松弛曲线

Fig.4 Stress-relaxation curve of shape function and original test data

1.2.2.2 蠕变试验特征曲线

应用Matlab软件对蠕变试验数据进行曲线拟合, 拟合函数为:

$$\varepsilon = a \exp(bt) + c \exp(dt) \quad (4)$$

试验数据和拟合曲线见图5, 拟合得到 a, b, c, d 分别为3.07, 8.451×10^{-6} , -1.028 , $-0.000 363 9$, 该拟合曲线的精确度为95%。由图5和式(4)可以看出, 小麦秸秆缓冲包装材料在一定静压力作用下, 应变随着时间的变化而变化, 属于粘弹性材料的行为。

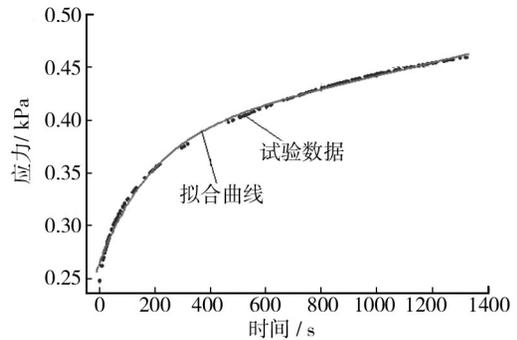


图5 形状函数与原试验数据的蠕变曲线

Fig.5 Creep curve of shape function and original test data

2 动态压缩试验

2.1 材料与方法

试验材料是小麦秸秆缓冲包装材料, 密度为289.2 g/mm³, 形状为正四边形。按照GB 8167—08《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》^[7], 对麦秆发泡包装衬垫进行动态压缩试验。试样面积为100 mm × 100 mm, 麦秆发泡包装衬垫的试样数量为5件。试验前, 对所有试样进行温湿度预处理(温度为21 ℃, 相对湿度为64%)。

2.2 结果

动态压缩试验数据见表1。试验中由计算机自动测试重锤跌落时小麦秸秆缓冲包装材料的最大加速度-时间曲线。静应力在0.012 MPa时, 第5次冲击得到的小麦秸秆缓冲包装材料的最大加速度-时间曲线见图6。由表1得到小麦秸秆缓冲包装材料的最大加速度-静应力曲线见图7。

表1 动态压缩试验数据结果

Tab.1 The results of dynamic compression test

静应力/MPa	第1次冲击	第2次冲击	第3次冲击	第4次冲击	第5次冲击	1—5次平均值	2—5次平均值
0.011	46.93	77.93	76.50	74.50	83.77	71.926	78.175
0.012	62.78	72.07	77.49	72.41	87.54	74.458	77.378
0.013	71.15	79.88	73.41	73.20	68.05	73.138	73.635
0.014	64.42	70.92	70.20	77.61	74.75	71.580	73.370
0.016	68.50	72.63	75.03	77.35	77.05	74.112	75.515

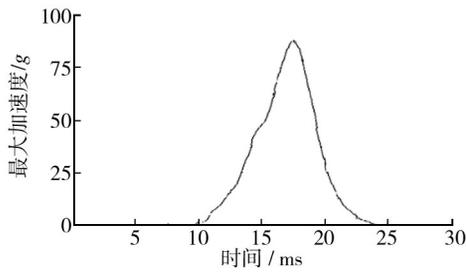


图6 最大加速度-时间曲线

Fig.6 The maximum acceleration-time curve

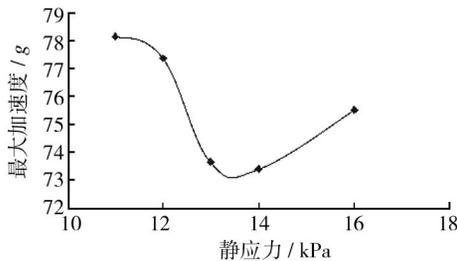


图7 最大加速度-静应力曲线

Fig.7 The $G_m-\sigma_s$ curve

2.3 力学模型

在测试小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能实验中,可知该材料不仅具有弹性,还具有粘性,是一种非线性粘弹性缓冲材料。根据胡强等人^[18]通过Volterra-Frecher积分型本构方程推导出相应的微分型本构方程可知,非线性粘弹性材料静态应力-应变关系式可视为其微分型本构方程中应力和应变导数恒为0的情况。反之,在非线性粘弹性材料的静态应力-应变关系式中添加应力和应变的导数项,则得到其动态条件下的应力-应变关系式。文中通过静态压缩试验拟合小麦秸秆缓冲包装材料的静态压缩应力-应变曲线,建立非线性弹性模型。以该非线性弹性模型为基础,增添应力和应变的一阶导数各一项,忽略应力和应变的高次导数项,得到非线性粘弹性模型:

$$\sigma + b\dot{\sigma} = a_3 \tanh^3(a_1\varepsilon) + a_4 \tan(a_2\varepsilon) + a_5 \tan^3(a_2\varepsilon) + a_6\dot{\varepsilon} \quad (5)$$

式中,参数 a_1-a_5 在1.1.2节中所建立的非线性弹性模型中已经拟合得出。通过遗传算法对式(5)进行参数优化识别,得到 $a_6=-0.151 \text{ MPa}\cdot\text{s}, b=3258.1 \text{ s}$ 。

小麦秸秆缓冲包装材料的力学模型为:

$$\sigma + 3258.1\dot{\sigma} = 91.7 \tanh^3(3.922\varepsilon) - 17.11 \tan(1.922\varepsilon) + 114.4 \tan^3(1.922\varepsilon) - 15.1\dot{\varepsilon} \quad (6)$$

根据式(6)绘制在跌落高度 $H=40 \text{ cm}$ 的条件下不

同厚度小麦秸秆缓冲包装材料的最大加速度-静应力曲线,见图8。其中 \otimes 为试验测得的数据点。

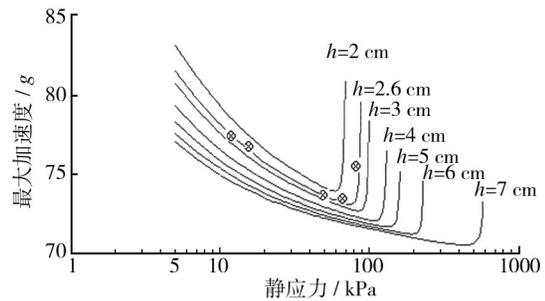


图8 不同厚度下的最大加速度-静应力曲线

Fig.8 The $G_m-\sigma_s$ curves at different thickness

3 结果分析

通过对小麦秸秆缓冲包装材料进行静态压缩、蠕变松弛以及动态压缩等力学性能试验,结果发现小麦秸秆缓冲包装材料的静态应力-应变曲线与泡沫塑料的静态应力-应变曲线比较接近,说明其静态性能与泡沫塑料接近。在应力松弛曲线上发现,当时间足够长时,应力将趋近于0,说明小麦秸秆缓冲包装材料存在粘性流动,具有粘性。蠕变曲线发现小麦秸秆缓冲包装材料在一定静压力作用下,应变会随着时间而变化而变化,属于粘弹性材料的行为。动态缓冲曲线呈凹谷状、开口向上,与其他缓冲材料曲线形状类似。

4 结语

1) 对小麦秸秆缓冲包装材料进行静态压缩试验,通过数据建立了描述小麦秸秆缓冲包装材料静态非线性弹性性能的本构关系,并利用试验数据识别了参数。

2) 对小麦秸秆缓冲包装材料进行蠕变松弛试验,通过数据建立了描述小麦秸秆蠕变松弛曲线函数关系,并利用试验数据识别了参数。

3) 通过对小麦秸秆缓冲包装材料静态压缩试验建立的非线性弹性分析,加上对小麦秸秆缓冲包装材料做进一步的松弛蠕变试验,并对其松弛蠕变曲线函数进行分析,可以看出该材料具有粘性。由此,初步可以判断小麦秸秆缓冲包装材料是一种非线性粘弹性材料。

4) 对小麦秸秆缓冲包装材料进行动态压缩试验,在非线性弹性性能模型的基础上,建立了其动态力学性能,通过遗传算法并利用试验数据识别了参数。

5) 通过对小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能测试, 得到其为非线性粘弹性材料, 其性能较泡沫塑料还有差距, 需进一步研究改进。

参考文献:

- [1] 高德, 周建伟, 张萍, 等. 植物秸秆绿色包装材料的研究现状与发展前景[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 30—34.
GAO De, ZHOU Jian-wei, ZHANG Ping, et al. Current Status and Prospect of Development of Plant Straw Green Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 30—34.
- [2] 刘金花, 张蕾. 植物纤维在可降解包装材料中的研究进展[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 267—269.
LIU Jin-hua, ZHANG Lei. Research Progress of Plant Fiber for Biodegradable Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 267—269.
- [3] 张秀梅, 徐伟民. 小麦秸秆发泡包装衬垫非线性粘弹性模型及参数识别[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 17—22.
ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min. Nonlinear Viscoelastic Models of the Straw Foamed Packaging Material and Identification Parameters[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 17—22.
- [4] 王红伟. 生物性包装材料的现状与发展前景[J]. 塑料包装, 2014, 24(4): 1—4.
WANG Hong-wei. Current Status and Development Prospects of Biological Packaging Materials[J]. Plastics Packaging, 2014, 24(4): 1—4.
- [5] 夏星兰. 秸秆纤维/PVC发泡材料的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
XIA Xing-lan. Study on Straw-fiber/PVC Foaming Material [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013.
- [6] 郭震. 生态化缓冲包装材料研制及机理研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2011.
GUO Zhen. Research of Ecological Cushion Packaging Material and Mechanism Study[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2011.
- [7] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006.
PENG Guo-xun. Design of Transportation Packaging[M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2006.
- [8] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(7): 149—155.
LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 149—155.
- [9] 李书印, 万明习, 李玉成, 等. 从静态压缩试验结果看缓冲包装材料特性[J]. 中国包装, 1999, 19(3): 94—97.
LI Shu-yin, WAN Ming-xi, LI Yu-cheng, et al. Cushioning Characteristics of Materials Based on Static Compressing[J]. China Packaging, 1999, 19(3): 94—97.
- [10] 明星, 赵燕, 卢杰, 等. 基于静态压缩试验的缓冲包装材料性能对比分析[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 59—61.
MING Xing, ZHAO Yan, LU Jie, et al. Contrast and Analysis of Packaging Material Buffering Performance Based on Static Compression Testing[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 59—61.
- [11] 孙聚杰, 温时宝. EPE静态压缩应力-应变曲线模拟[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(1): 37—39.
SUN Ju-jie, WEN Shi-bao. Simulation of Stress-strain Curves for EPE Static Compression[J]. Food and Packaging Machinery, 2009, 27(1): 37—39.
- [12] 李厚民, 朱若燕, 杨晓俊, 等. 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 9—11.
LI Hou-min, ZHU Ruo-yan, YANG Xiao-jun, et al. Research on the Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 9—11.
- [13] MILDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24: 352—461.
- [14] GB 8168—87, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB 8168—87, Static Compression for Package Cushioning Materials Experiment Method[S].
- [15] 何志, 张瑞杰, 介万奇. 用Levenberg-Marquardt算法计算相图[J]. 有色金属, 2006, 58(3): 51—53.
HE Zhi, ZHANG Rui-jie, JIE Wan-qi. Phase Equilibria Calculation with Levenberg-Marquardt Method[J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(3): 51—53.
- [16] GB/T 14745—93, 包装缓冲材料蠕变特性试验方法[S].
GB/T 14745—93, Packaging Cushioning Materials Test Method for Creep Properties[S].
- [17] GB 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].
GB 8167—2008, Dynamic Compression for Package Cushioning Materials Experiment Method[S].
- [18] 胡强, 童忠仿. 泡沫塑料包装衬垫缓冲性能建模[J]. 振动工程学报, 1990, 3(9): 9—17.
HU Qiang, TONG Zhong-fang. Modeling of Dynamic Cushioning Performances of Expanded Plastics Cushions in Shockproof Packaging[J]. Journal of Vibration Engineering, 1990, 3(9): 9—17.