定则振动系统下黄冠梨振动特性及损伤研究

曹旭东，胡洋，许腾宇，张玉枫，方健
（北京林业大学 木质材料科学与应用教育部重点实验室，北京 100083）

摘要：目的 通过对黄冠梨进行振动试验测试，研究其在定则振动系统下的振动特性以及振动加速度、振动频率与其他振动参数对黄冠梨损伤的影响，建立黄冠梨面积、体积损伤率与时间关系模型。**方法** 通过定则振动中的扫频试验和定频试验，分析黄冠梨的振动加速度与共振频率、能量传递率之间的关系，研究黄冠梨面积损伤率和体积损伤率的变化规律。**结果** 黄冠梨的共振频率随加速度的增大呈下降趋势，0.85*g* 后共振频率基本无明显变化，7 层黄冠梨从下至上各层共振频率变化趋势相似。随着振动加速度的增大，单层黄冠梨的共振频率与能量传递率均逐渐变小。**结论** 单层黄冠梨的加速度与共振频率呈非线性关系，多层黄冠梨的面积损伤率与体积损伤率随着层数的增加而变大，其共振频率随着层数的增加而减小。

关键词：黄冠梨；定则振动；振动特性；损伤
中图分类号：TB485.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2017)17-0102-06

Vibration Characteristic and Injury of Huangguan Pearunder Stationary Vibration System

CAO Xu-dong, *HU Yang*, *XU Teng-yu*, *ZHANG Yu-feng*, *FANG Jian*
(Key Laboratory of Wood Material Science and Application, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of vibration characteristics, vibration acceleration, vibration frequency and othervibration parameters on the injury of Huangguan pear under the stationary vibration system, and establish the model for the relationship between the injury rates of Huangguan pear area and volume and the time, through its vibration test. Based on the sweep scanning and fixed frequency testsin the stationary vibration, the relationship between Huangguan pear vibration acceleration, resonance frequency andenergy transfer rate was analyzed. The change law of injury rates of Huangguan pear area and volume was studied. The resonance frequency of Huanggu pear decreased with the increase in the acceleration, and itbasically had no obvious change after 0.85*g*. The change trend of resonance frequency of Huanggu pear from the bottom up was similar in each layer (7 layers in total). With the increase in the vibration acceleration, both the resonance frequency and the energy transfer rate of Huangguan pear in a single layer become smaller. The acceleration and the resonance frequency of Huangguan pear in a single layer is in a nonlinear relationship. The injury rates of Huangguan pear area and volume in multiple layers become bigger with the increase in the layer number. The resonance frequency decreases with the increase in the layer number.

KEY WORDS: Huangguan pear; stationary vibration; vibration characteristics; injury

我国是一个水果大国，但由于我国物流运输行业的缺陷，水果因为物流原因造成约 30%的损伤，每年因为采摘前后各方面原因给水果以及蔬菜造成的损伤达 1000 亿元人民币[1—3]。反观发达国家，其果品

收稿日期：2016-07-23
基金项目：北京高等学校青年英才计划（YETP0761）；北京市大学生创新创业项目（S201510022044）
作者简介：曹旭东（1995—），男，北京林业大学硕士生，主攻运输包装、功能性包装材料。
通讯作者：方健（1978—），女，博士，北京林业大学副教授，主要研究方向为功能性包装材料。

损失率仅为 5%左右，因此我国水果的物流与包装需要立即采取措施来控制水果运输中的损失率[4—7]。研究果品在无包装条件下的振动特性，是对果品现有缓冲包装进行优化设计的关键。在定则振动控制技术中，定频振动与扫频振动是 2 个主要振动形式，近年来国内学者越来越重视果品的定则振动研究[8—12]。

1　实验

1.1　材料和设备

试验为振动试验，所选设备为 DC 电动振动系统（型号为 DC-300-3）。材料为新鲜黄冠梨，产地为中国河北，果实外表无机械损伤，形状规则，成熟度基本一致，质量为 265~300 g，垂直果柄方向直径为 75.80~80.10 mm，坚实度为 0.29~0.35 MPa。分别对单层黄冠梨和多层黄冠梨（7 层，从下到上依次定义为 1~7 层）进行试验，每层皇冠梨个数为 16 个。

1.2　方法

1.2.1　扫频振动试验

分别对单层黄冠梨和多层黄冠梨进行试验。按照 GB 4857.1 对试样进行编号，依据 GB 4857.2 选定温度为 20 ℃，相对湿度为 50%，按照 GB 4857.10 进行试验。试验后，将黄冠梨置于室温（25 ℃）条件下 48 h，测量损伤情况。

单层黄冠梨扫频范围为 4~100 Hz，加速度分别取 0.15g，0.25g，0.35g，0.45g，0.55g，0.65g，0.75g，0.85g，0.95g，1.05g。每次扫频时间为 60 min，试样数量为每层 16 个，各方式的试验进行 5 组，各工况试验重复 5 次。7 层黄冠梨扫频范围为 4~100 Hz，测试加速度与单层扫频试验相同。试验时间为 1，2，3，4，5，6 h，每种试验重复进行 5 次，试验样品为每层 16 个[13]。

1.2.2　定频振动试验

将单层梨果实试样置于振动台上，设定不同振动加速度测试条件分别为 0.15g，0.25g，0.35g，0.45g，0.55g，0.65g，0.75g，0.85g，0.95g，1.05g，振动频率为 4 Hz。试验时间分别为 1，2，3，4，5，6 h，每种试验具有 16 个样品，每组工况试验重复 5 次。试验后将黄冠梨置于室温条件下 48 h，测量其体积和面积的变化。

1.2.3　损伤程度表征

黄冠梨的机械损伤程度用面积损伤率和体积损伤率来表征。

1.2.3.1　面积损伤率测量法

用颜色变化及范围大小表征损伤程度，基于微积分法计算损伤面积[14—16]。面积损伤率为损伤面积与被测黄冠梨面积的比值，即 $\eta=\frac{A_{损}}{A_{总}}\times100\%$。$\eta$ 为黄冠梨面积损伤率（%）；$A_{损}$为黄冠梨损伤面积（mm^2）；$A_{总}$为黄冠梨的总面积（mm^2）。

1.2.3.2　体积损伤率测量法

1）果实表面发生损伤。将黄冠梨的损伤区域从中央切开，观察切面处褐变情况，若为白色梨瓤，则只切除果实表面大约 1 mm 深度的褐变区域作为损伤体积，即 $V_{损}=A_{损}\times1$ mm。$V_{损}$为黄冠梨损伤体积（mm^3）。

2）果实内部果肉发生损伤。利用近似球状计算椭圆处损伤体积，计算原理见图 1。将损伤区域沿着纵向切开后的尺寸作为褐变区域横向宽度，再将其水平切开，测量深度，将损伤区域分为上下部分，则黄冠梨的损伤体积 $V_{损}=V_1+V_2=\frac{\pi}{24}[3L^2(h_1+h_2)+4h_1^3+4h_2^3)$，黄冠梨体积损伤率为 $\eta_V=\frac{V_{损}}{V_{总}}\times100\%$。$V_{总}$为黄冠梨的体积（mm^3）。

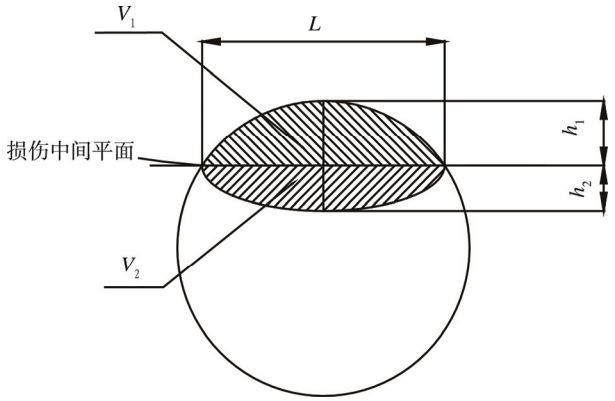

图 1　黄冠梨损伤体积计算

Fig.1 Volume of Huangguan pear

2　结果与分析

2.1　扫频振动试验

2.1.1　单层黄冠梨的振动特性与加速度的关系

扫频振动加速度对黄冠梨的振动特性有很大影响。在单次振动时间为 1 h、振动台加速度处于 0.15g~1.05g 之间时，加速度对单层黄冠梨的共振频率和能量传递率的影响见表 1。

通过表 1 中共振频率的比较发现，单层黄冠梨的共振频率随着扫频振动加速度的增大而逐渐减小。加速度值大于 0.85g 时，黄冠梨共振频率趋于稳定，这是因为黄冠梨属于粘弹性体，当加速度在 0.15g~0.55g 之间时，黄冠梨所受的外界冲击力小，对黄冠梨内部物质的损坏程度低，黄冠梨硬度没有显著变化。从 0.85g 开始，黄冠梨所受到的外界响应逐渐接近自身重力加速度，黄冠梨的内部物质损伤程度逐渐增大，

表 1 黄冠梨振动特性与加速度的关系

Tab.1 Relationship between vibration characteristics and acceleration of Huangguan pear

加速度(g)	共振频率/Hz	能量传递率/%
0.15	78.80	20.40
0.25	76.00	20.50
0.35	74.98	20.60
0.45	72.00	20.10
0.55	71.00	20.43
0.65	64.05	17.76
0.75	52.91	17.30
0.85	27.22	16.30
0.95	27.10	16.20
1.05	27.00	21.80

黄冠梨内部组织结构被损坏，果实硬度降低，无法及时对振动台的响应作出振动反应，使得共振频率发生了变化。

通过表 1 中能量传递率的比较可知，在 0.15*g*~0.95*g* 范围内，能量传递率峰值随加速度的增大逐渐减小。当加速度为 1.05*g* 时，能量传递率急剧增大。这是因为在 0.15*g*~0.95*g* 范围内，在外界加速度冲击下的黄冠梨相当于承受一次次振幅较小的冲击，内部组织受到损伤使其质地变软，损伤部位吸收了部分能量，使黄冠梨的能量传递率峰值有减小的趋势，同时因为振动台的加速度值均小于重力加速度，黄冠梨所受到的冲击力小于 1.05*g* 的冲击力，因此在加速度为 1.05*g* 时，黄冠梨的能量传递率普遍高于 0.95*g*。

2.1.2 损伤特性与加速度、振动时间的关系

在加速度为 0.15*g*~1.05*g*、振动时间为 1~6 h 时，单层黄冠梨的面积损伤率、体积损伤率见表 2—3。

表 2 不同条件下黄冠梨的面积损伤率

Tab.2 Area damage rate of Huangguan pear under different conditions %

加速度(g)	振动时间/h					
	1	2	3	4	5	6
0.15	1.132	1.189	1.415	1.982	2.604	2.831
0.25	1.302	1.331	1.359	2.265	2.944	3.114
0.35	1.472	1.529	1.699	2.831	3.114	3.397
0.45	1.699	1.982	2.265	3.397	3.963	4.529
0.55	2.265	2.831	3.397	5.662	6.794	7.360
0.65	3.397	3.963	4.529	7.360	8.943	9.059
0.75	4.246	5.662	6.794	9.625	10.760	11.320
0.85	5.096	6.228	7.304	10.760	14.660	15.290
0.95	5.662	7.360	8.436	11.320	15.290	16.990
1.05	6.794	7.926	9.342	12.460	16.420	17.950

分析表 2 中面积损伤率与加速度的关系可知，振动时间一定时，黄冠梨的面积损伤率随加速度增大而增大。当加速度为 1.05*g* 时的黄冠梨面积损伤率约为 0.15*g* 加速度下的 6~9 倍。这是由于加速度为 1.05*g* 时，黄冠梨受到冲击发生旋转运动，在表面形成环形褐变损伤带，导致损伤面积迅速增加。

分析表 2 中面积损伤率与振动时间的关系可知，加速度一定时，随着时间的增加，黄冠梨的面积损伤率呈增大的趋势。振动时间从 1 h 增大到 4 h 时面积损伤率无明显增长，而当黄冠梨振动时间超过 5 h 后，损伤面积显著增加。

表 3 不同条件下黄冠梨的体积损伤率

Tab.3 Volume damage rate of Huangguan pear under different conditions %

加速度(g)	振动时间/h					
	1	2	3	4	5	6
0.15	0.095	0.104	0.118	0.154	0.213	0.258
0.25	0.106	0.109	0.113	0.186	0.240	0.267
0.35	0.131	0.131	0.140	0.231	0.263	0.281
0.45	0.145	0.177	0.190	0.281	0.331	0.403
0.55	0.190	0.254	0.281	0.544	0.634	0.630
0.65	0.276	0.331	0.403	0.630	0.675	0.760
0.75	0.362	0.498	0.584	0.815	1.083	1.087
0.85	0.453	0.544	0.598	0.951	1.178	1.264
0.95	0.498	0.634	0.661	0.951	0.309	1.404
1.05	0.589	0.725	0.747	1.042	1.359	1.495

分析表 3 中体积损伤率与加速度的关系可知，振动时间一定时，随着加速度的增大，黄冠梨的体积损伤率呈增大的趋势。当加速度由 0.15*g* 增大到 0.45*g* 时，黄冠梨的体积损伤变化幅度不是很大；当加速度在 0.55*g*~0.95*g* 时，黄冠梨的体积损伤变化幅度明显增大。这是因为当加速度由 0.15*g* 增大到 0.45*g* 时，黄冠梨受到振动台的冲击小，而当加速度逐渐增大至 1.05*g* 时，黄冠梨受到的冲击变大，相互之间的撞击使质地很脆的黄冠梨受到了很大的体积损伤，且随着加速度的增大，黄冠梨发生旋转，损伤体积增大。

分析表 3 中体积损伤率与振动时间的关系可知，加速度一定时，黄冠梨体积损伤率随振动时间的增加而增大。在 1~3 h 内，黄冠梨体积损伤率变化幅度缓慢，3 h 后损伤体积显著增大，最大相差 3.4%。这是因为随着振动时间的增大，黄冠梨的内部组织结构被破坏导致果肉组织变软，在继续振动的条件下，黄冠梨损伤部位承受冲击的能力下降，导致黄冠梨损伤体积迅速增加。

2.1.3 多层黄冠梨共振频率特性分析

通过在不同振动加速度下 7 层黄冠梨的扫频振动试验研究，发现当加速度一定时，黄冠梨的共振频率会随着层数的增加而呈现逐渐变小的趋势。

现以加速度 0.85*g* 时为例，具体阐述其共振频率规律。此时 1~7 层黄冠梨的共振频率分别为 69.7，66.5，52.9，40.2，21.8，21.3，19.6 Hz。其中 1~4 层的黄冠梨共振频率明显减小，从第 5 层开始黄冠梨的共振频率变化趋于平缓。这是因为下层黄冠梨受到上层黄冠梨的压力作用，其向上运动幅度较小，与振动台接触密切，能够直接受到振动台的加速度作用，共振频率较高。随着层数增加，黄冠梨受到压力减小，活动范围增大，黄冠梨之间的相互作用力使果实内部与硬度密切相关的细胞壁结构发生破坏，组织液等成分流出，造成黄冠梨硬度迅速降低，共振频率下降。

2.2　定频振动试验

2.2.1　损伤与时间的关系

多层黄冠梨在加速度为 0.85*g* 时的面积损伤率与时间的关系见图 2a。由图 2a 可知，随着振动时间的变化，黄冠梨的面积损伤率逐渐增大。其中，1~3 层时面积损伤增加较缓慢，4~7 层的损伤面积增加速度变快。第 1 层在 4 h 时达到的损伤面积与第 4 层在 2 h 时达到的损伤面积相近，第 4 层在 4 h 后的损伤面积又加剧上升。

多层黄冠梨体积损伤率与时间的关系曲线见图 2b。可以看出，随着振动时间的变化，黄冠梨的体积损伤率逐渐增大。前 3 层体积损伤率增加较缓慢，4~7 层的体积损伤率增加速度变快。

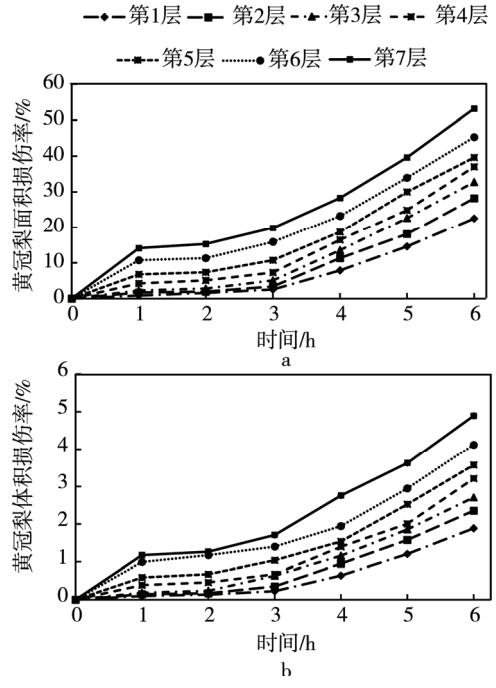

图 2　多层黄冠梨面积损伤率、体积损伤率与时间的关系曲线

Fig.2 The curve of the relationship between the area, volume injury rate and the time of Huangguan pear in multiple layers

2.2.2　定频试验损伤模型

通过黄冠梨的扫频振动试验可知，黄冠梨损伤程度与振动时间呈正相关，其具体关系对黄冠梨缓冲包装结构设计具有重要意义。通过改变振动时间，研究黄冠梨在定频试验中损伤面积与损伤体积的大小，并进行拟合，分别找到黄冠梨面积损伤、体积损伤与时间的耦合关系，即在加速度一定的情况下，黄冠梨各层的损伤面积和损伤体积均与振动时间成 3 次方相关。

1）通过拟合分别得到加速度在 0.85*g* 时的振动损伤面积、振动损伤体积与振动时间的关系。针对 0.85*g*，80 Hz 黄冠梨振动损伤面积数学模型进行了拟合，*y* 代表黄冠梨各层损伤面积，*x* 代表振动时间，得到了黄冠梨在 6 h 内的不同层的损伤面积拟合曲线，见表 4。为了验证以上 7 层黄冠梨振动损伤面积的 3 次方曲线拟合方程的正确性，且为节省成本，随机选取振动时间为 2.5 和 4.5 h，针对黄冠梨的各层振动损伤面积进行了测量，每种振动方式重复 3 次，测量结果与拟合计算结果见表 5。由表 4 可以看出平均误差大约在 10 mm^2 左右，由于微积分法本身因目测和计算会带来误差，该误差在允许范围内。由分析可知，振动时间是导致水果振动损伤的重要原因之一，经过较长时间的振动，水果才会产生损伤特性。

2）针对 0.85*g*，80 Hz 黄冠梨振动损伤体积数学模型进行了拟合，得到了黄冠梨在 6 h 内的不同层的损伤体积的拟合曲线，*y* 代表黄冠梨损伤体积，*x* 代表振动时间，见表 6。这里的验证方法同损伤面积测试方法。测量结果与拟合计算结果见表 7。从验证误差来看，平均误差在 40 mm^3 左右，对于整个试验而言，由于本身测量方法上存在试验误差，以及试验过程中四周纸板振动时对黄冠梨的摩擦等原因，该误差可视为正常误差范围内。由于损伤体积测量误差本身无法避免，所以 40 mm^3 在允许误差范围内，因此拟合曲线与实际体积趋势相符。

表 4　加速度为 0.85*g* 时黄冠梨损伤面积–时间拟合方程

Tab.4 The fittingequationof injury area and time of Huangguan pear at the acceleration of 0.85*g*

层数	黄冠梨损伤面积拟合方程	R^2
1	$y_1=12.22x^3+29.72x^2+2.171x$	0.995
2	$y_2=11.94x^3+49.12x^2+24.91x$	0.991
3	$y_3=8.055x^3+90.31x^2+33.02x$	0.992
4	$y_4=26.16x^3-83.54x^2+532.5x$	0.991
5	$y_5=25x^3-121.0x^2+833.7x$	0.986
6	$y_6=50x^3-389.2x^2+1686.x$	0.987
7	$y_7=72.22x^3-606.7x^2+2393x$	0.987

表 5 黄冠梨损伤面积拟合方程与实际测量面积对比
Tab.5 Comparison of the injury area fitting equitation and the actual measurement of Huangguan pear

层数	振动时间/h	实际测量损伤面积/mm^2	拟合方程计算面积/mm^2	平均误差/mm^2
1	2.5	392	382.15	9.85
	4.5	1735	1725.2	9.8
2	2.5	565	555.37	9.63
	4.5	2203	2194.8	8.2
3	2.5	782	772.844	9.156
	4.5	2721	2711.38	9.62
4	2.5	1227	1217.875	9.125
	4.5	3098	3088.395	9.605
5	2.5	1728	1718.625	9.375
	4.5	3589	3579.525	9.475
6	2.5	2570	2563.75	6.25
	4.5	4272	4261.95	10.05
7	2.5	3324	3319.063	4.937
	4.5	5074	5063.872	10.128

表 6 加速度为 0.85g 时黄冠梨损伤体积–时间拟合方程
Tab.6 The fitting equation of injury volume and time of Huangguan pear at the acceleration of 0.85g

层数	黄冠梨损伤体积拟合方程	R^2
1	$y_1=16.66x^3-5.754x^2+78.19x$	0.995
2	$y_2=8.555x^3+78.40x^2+6.722x$	0.994
3	$y_3=6.944x^3+96.15x^2+108.3x$	0.997
4	$y_4=39.69x^3-179.8x^2+745.2x$	0.993
5	$y_5=47.22x^3-280.6x^2+1186.x$	0.993
6	$y_6=85.86x^3-680.1x^2+2356.x$	0.991
7	$y_7=58.61x^3-469.2x^2+2247.x$	0.985

表 7 黄冠梨损伤体积–时间拟合方程与实际测量面积对比
Tab.7 Comparison of the injury volume fitting equitationandthe actual measurement of Huangguan pear

层数	振动时间/h	实际测量损伤体积/mm^3	拟合方程计算体积/mm^3	平均误差/mm^3
1	2.5	469	419.825	49.175
	4.5	1793	1753.4	39.6
2	2.5	680	640.47	39.53
	4.5	2417	2397.4	19.6
3	2.5	1070	980.17	89.83
	4.5	3107	3067.3	39.7
4	2.5	1399	1359.4	39.6
	4.5	3369	3329.2	39.8
5	2.5	3041	3001.3	39.7
	4.5	8417	8377.2	39.8
6	2.5	3020	2980.9	39.1
	4.5	4693	4653.9	39.1
7	2.5	3730	3600.7	129.3
	4.5	5991	5951.9	39.1

3 结语

通过黄冠梨的振动试验，分析了单层及多层黄冠梨的振动特性及振动参数对果实损伤的影响，得到了黄冠梨的面积损伤率以及体积损伤率随时间的变化趋势以及拟合关系。通过对黄冠梨定则振动下损伤的分析，结果表明：单层黄冠梨的共振频率和能量传递率均随扫频振动加速度的增大呈下降的趋势；多层黄冠梨的面积损伤率与体积损伤率均随着层数的增加而变大，第 3 层以上的黄冠梨面积损伤率和体积损伤率增加速度均明显变大；黄冠梨的共振频率随层数的增加而降低，第 4 层以上的梨果实共振频率大幅度下降；黄冠梨损伤面积及损伤体积与振动时间均为 3 次相关关系。由于黄冠梨超过 4 层的部分损伤就会明显增大，因此其运输包装最好设计为 3 层，从而减少实际运输中黄冠梨的受损程度。

参考文献：

[1] 钱骁, 李丹, 田会清, 等. 京城果蔬商户降低物流损耗方法分析[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(1): 49—53.
QIAN Xiao, LI Dan, TIAN Hui-qing, et al. City Fruit and Vegetable Merchants Reduce Loss Analysis[J]. Food and Nutrition in China, 2012, 18 (1): 49—53.

[2] 朱振家, 杨瑞. 预冷技术及冷链物流在果蔬产业中的应用及展望[J]. 农产品加工, 2014, 15(6): 32—34.
ZHU Zhen-jia, YANG Rui. Application of Cold Pre-cooling Technology and Cold Chain Logistics in Fruit and Vegetable Industry[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014, 15(6): 32—34.

[3] 张连文, 杨传民, 王勇, 等. 樱桃番茄运输包装件振动冲击性能实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 125—130.
ZHANG Lian-wen, YANG Chuan-min, WANG Yong, et al. Vibration Impact Test for Transport Packages of Cherry Tomato[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 125—130.

[4] 张鸣宇, 张连文, 骆紫晨, 等. 库尔勒香梨物流堆码运输包装件振动传递实验研究[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(4): 13—17.
ZHANG Ming-yu, ZHANG Lian-wen, LUO Zi-chen, et al. Vibration Transmission Korla Pear Logistics Transport Package Stacking Experimental Study[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(4): 13—17.

[5] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 稳定振动条件下梨的振动损伤研究[J]. 农业机械学报, 2004(3): 105—108.
KANG Wei-min, XIAO Nian-xin, CAI Jin-xing, et al. Study on Pears under Steady Vibration[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2004(3): 105—108.

[6] 高永毅, 焦群英, 唐果, 等. 水果机械损伤研究概况及发展趋势[J]. 矿业工程研究, 2002, 24(3): 26—29.
GAO Yong-yi, JIAO Qun-ying, TANG Guo, et al. Re-

search Situation and Development Trend of Fruits Mechanical Damage[J]. Mining Engineering Studies, 2002, 24(3): 26—29.

[7] 宋恩鹏, 马致旸. 振动实验在包装测试中的应用[J]. 环境技术, 2014(6): 21—24.
SONG En-peng, MA Zhi-yang. Vibration Experiment on Application of Packaging Test[J]. Environmental Technology, 2014(6): 21—24.

[8] 王璐璐, 刘美华, 张连文, 等. 果品物流运输包装件堆码振动传递性能的实验研究[C]//第十四届全国包装工程学术会议暨 2012 国际包装科技研讨会, 2012.
WANG Lu-lu, LIU Mei-hua, ZHANG Lian-wen, et al. Experimental Study of Fruits Logistics Transport Package Stacking Vibration Transfer Properties[C]// Fourteenth National Packaging Engineering Conference and the International Packaging Technology Symposium of 2012, 2012.

[9] 孙书静. 水果运输包装新技术[J]. 包装世界, 2003(6): 32—35.
SUN Shu-jing. Transport Fruits Packaging Technologies[J]. Packaging World, 2003(6): 32—35.

[10] 王芳, 魏星, 魏巍, 等. 果蔬运输受振动、冲击作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015(2): 326—329.
WANG Fang, WEI Xing, WEI Wei, et al. Advances in Transport by Vibration and Shock Effect of Fruits and Vegetables[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015(2): 326—329.

[11] 李萍, 王若伊. 果蔬运输振动损伤及其减振包装设计[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5):353—357.
LI Ping, WANG Ruo-yi. Fruit and Vegetable Transport Vibration Damping Injury and Packaging Design[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 353—357

[12] 程旭, 杨晓清. 蜜瓜运输共振频率的测定及其对储藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015(11): 294—299.
CHENG Xu, YANG Xiao-qing. Melon Transport Measurement of the Resonance Frequency and Its Impact on Storage Quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(11): 294— 299.

[13] 邵文全, 计宏伟, 李砚明, 等. 信号采集仪运输包装件缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 11—14.
SHAO Wen-quan, JI Hong-wei, LI Yan-ming, et al. Signal Acquisition Device Transport Package Cushioning Properties[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 11—14.

[14] LU L X, SUN Y P, WANG Z W. Critical Buckling Load of Paper Honeycomb under Out-of-plane Pressure[J]. Packaging Technology and Science, 2005(18): 141—150.

[15] CHONHENCHOB V, SINGH S P. Packaging Performance Comparison for Distribution and Export of Papaya Fruit[J]. Packaging Technology and Science, 2005 (18): 125—131.

[16] 陈志强. 运输包装振动试验方法解析[J]. 印刷技术, 2009(22): 27—30.

[17] CHEN Zhi-qiang. Test Method for Vibration Analysis of Transport Package[J]. Printing Technology, 2009 (22): 27—30.