

半正弦激励下烤箱脆值及破损边界曲线试验分析

李志强^{1,2}, 王羽星^{1,2}, 张素风^{1,2}

(1.陕西科技大学, 西安 710021; 2.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 为了获取烤箱产品在半正弦激励下的破损边界曲线和机械冲击脆值, 解决因脆值选取不合理而造成的过包装问题。**方法** 参考 ASTM D 3332 及相关理论, 并通过预试验确定试验的相关参数, 根据预试验参数, 分别进行产品临界速度变化量测定试验, 以及临界加速度测定试验, 从而确定产品的破损边界曲线和脆值。**结果** 该产品的临界速度变化值 $\Delta v_c=2.27$ m/s, 第 1 次和第 2 次临界加速度测量值分别为 $G_{m1}=72.93g$, $G_{m2}=65.06g$, 脆值 $G=52g$, 并得到了破损边界曲线。**结论** 试验结果为缓冲包装设计提供了可靠的脆值数据, 为包装结构设计的合理性提供依据; 试验中运用的产品破损边界曲线及产品本身的机械冲击脆值的测定方法对同类试验具有一定参考意义。

关键词: 半正弦激励; 破损边界曲线; 机械冲击脆值

中图分类号: TB482.2; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)05-0165-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.023

Experimental Analysis of Fragility and Damage Boundary Curve of Oven under Half-sinusoidal Excitation

LI Zhi-qiang^{1,2}, WANG Yu-xing^{1,2}, ZHANG Su-feng^{1,2}

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain the damage boundary curve and the mechanical shock fragility of oven products under half-sinusoidal excitation, to solve the problem of over-packaging caused by unreasonable selection of fragility. Referring to ASTM D3332 standard and related theory, relevant parameters of the test were determined by pre-test. Then, the product critical velocity variation measurement test and the critical acceleration measurement test were carried out respectively according to the pre-test parameters, and then the damage boundary curve and the fragility of product were obtained. The critical velocity variation was $\Delta v_c=2.27$ m/s. The first critical acceleration (G_{m1}) was $72.93g$, the second critical acceleration (G_{m2}) was $65.06g$, and the fragility (G) was $52g$. The damage boundary curve of the product was obtained. The test results provided reliable fragility data for design of cushioning packaging, and a basis for the rationality of the subsequent packaging structure design. Moreover, the product damage boundary curve and the measurement method of mechanical shock fragility of the product itself used in this test can provide some reference for similar tests.

KEY WORDS: half sinusoidal excitation; breakage boundary curve; mechanical shock fragility

1968年, 美国学者 Newton^[1]提出了“破损边界理论”, 开创了对产品进行缓冲实验的理论基础与试验

程序, 但该理论是基于将产品包装系统简化为单自由度的线性系统这一假设条件产生的, 且该试验是将矩

收稿日期: 2019-08-09

作者简介: 李志强 (1976—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为绿色包装技术与解决方案。

通信作者: 张素风 (1972—), 女, 博士, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为纤维新材料与纸基复合材料。

形波作为输入动态载荷(脉冲),得到产品极限最大加速度(冲击脆值)与速度变化之间的关系曲线。根据宋宝丰、袁志庆^[2-4]构建的基于响应的破损边界曲线一文可知,采用上述途径设计出的产品缓冲结构,当其经受的最大冲击加速度超过了临界最大冲击加速度时,产品并未出现损坏,这就意味着该理论和方法存在着保守性,而基于此方法的设计会使产品产生过度包装问题。造成这种保守性的主要原因在于:利用冲击试验台测定产品破损边界曲线时,输入的脉冲激励为矩形波,而这种波形对于产品而言是最严酷的外界状态,但在实际运输中,激励的冲击波形一般是近似于半正弦波的,因此,上述方法在实际应用上具有显著的局限性^[5-6]。

与此同时,也有学者进行非线性方面的研究。不过,大量学者只是将产品包装系统处理为单自由度或二自由度非线性系统进行理论分析。其中,胡长鹰^[7]建立了线性、非线性缓冲包装系统的无量纲跌落冲击方程,并提出了评价线性与非线性包装系统产品安全与否的跌落破损边界曲线的概念。王志伟等^[8]采用了数值分析的方法求解了单自由度、二自由度产品包装系统的非线性动力学方程,并系统地研究了正切型、双曲正切型和三次型非线性系统在各种典型加速度脉冲(矩形、半正弦、前峰锯齿和后峰锯齿)激励下的冲击谱和破损边界曲线。不仅如此,王军、卢立新、王志伟等^[9-10]基于传统破损边界曲线的研究,通过增加系统参数变量,提出了三维破损边界曲面的新概念。不难发现,上述的研究分析都忽略了缓冲包装系统实际上是多自由度的复杂耦合结构系统。

文中借鉴 Goff 和 Pierce^[11]所提出的使用半正弦冲击脉冲来描述脆值及破损边界曲线的建议,并以某品牌烤箱为研究对象,通过试验分析得到半正弦激励下烤箱产品的破损边界曲线及产品脆值,以改善矩形波作为脉冲激励时得到的脆值过于保守,导致后续缓冲包装设计不合理的情况。

1 脆值试验

1.1 试样与仪器

研究对象为市面上常见的家用迷你烤箱,质量为 2.6 kg,对应的产品主机尺寸为 381 mm×282 mm×209 mm。

采用冲击试验台(苏试 CL-200)进行试验测定。信号采集和分析工作由冲击测量控制分析系统(KLC-2000)完成。产品与试验设备见图 1。

1.2 标准与方法

试验采用的脉冲激励为半正弦波,其中半正弦波的脉宽由波形发生器控制,因此,改变波形发生器的



图 1 产品试样与试验设备

Fig.1 Products and test equipment

有关参数即可控制脉宽。试验中,设置的脉冲冲击激励脉宽为 3 ms,满足脉冲持续时间 $T_P \leq 3$ ms 的试验要求。

同时,试验参考的标准为 ASTM-D 3332^[12]。因该试验选定的波形为半正弦波,在测定临界加速度冲击曲线时,不能与使用矩形波作为脉冲激励的试验一样,依靠调节氮气压力来改变加速度的值,而是需要依靠缓冲组合垫来调整,因此,需额外设置预试验来减少因试验参数设置不合理而导致的产品失效与破损的情况。

1.2.1 临界速度变化冲击试验

用夹具将产品固定在冲击台体上,使产品的支撑结构、形状与运输过程中使用缓冲垫时一致。依据预试验得出的相关参数,在试验台面底部放置聚氨酯波形块并将合适的组合垫放置在冲击座上。选取产品的初始跌落高度为 130 mm,其跌落高度相对较低,目的是使试验台收到冲击脉冲产生低于产品预期临界加速度的速度变化。试验时,逐步提升跌落高度,使产品的速度改变量 Δv 逐步增加并将其增加量控制在 0.13 m/s 左右。试验直至产品破损时结束,取产品损坏前的最后一次试验值和发生损坏后的试验值的平均值作为临界速度值 Δv_c ^[13-15]。

1.2.2 临界加速度冲击试验

速度变化量 Δv 是由跌落高度 H 决定的^[16],为保证绝对跌落高度不变。即各次试验的速度改变量基本相同,需在预试验环节通过调整组合垫的厚度与相对跌落高度,来得到保证速度变化量基本不变的一系列设置参数。脉冲峰值是由组合垫决定的^[16],因此在进行冲击试验时为使加速度逐步递增,需使组合垫厚度、软硬程度分别由厚到薄、由软到硬。试验中,加速度增加的幅度需要根据预试验设置与产品本身的特点来决定。该试验需直至产品破损后结束,临界加

速度值 G_m 的取值为损坏前的最后一次试验值和发生损坏后的试验值的平均值。

1.2.3 确定破损边界及脆值

产品破损边界曲线反映的是最大加速度、冲击脉冲形状与速度变化量三者之间的关系^[17]。由于该产品的试验冲击波形为半正弦波,其损坏边界曲线并不是简单地由 2 条直线组成,因此,需要根据产品的价格及数量进行至少 2 次同一跌落面、跌落方向的临界加速度的试验,才能保证得到正确可靠的产品损坏边界曲线。

产品极限脆值 G_{jx} 反映的是产品历经多次冲击得到的多个临界加速度值中的最小值,因半正弦波的破损边界在矩形脉冲的临界加速度线以内^[18],所以必有:

$$\frac{G}{G_{jx}}=K<1$$

(1)

式中: G 为产品脆值; K 为安全系数,通常取 K 为 0.7~0.8。

根据试验方法、对应的试验步骤以及式 (1) 即可得到该产品的脆值 G 。

2 结果与讨论

在试验过程中发现,速度改变量在一定程度上受缓冲衬垫的影响。不仅如此,加速度的改变在一定程度上受跌落高度影响。尤其当冲击次数变多以后,组合垫的弹性会发生变化,因此,需放上模拟件预调。

2.1 产品临界速度变化冲击试验

产品临界速度变化冲击试验数据见表 1。试验步骤及表 1 最后 2 行中的 Δv 可知,产品临界速度变化

量 $\Delta v_c=2.27\text{ m/s}$ 。
产品在临界速度变化试验中所经历的 10 次冲击见图 2,其中第 10 次冲击造成产品破损。

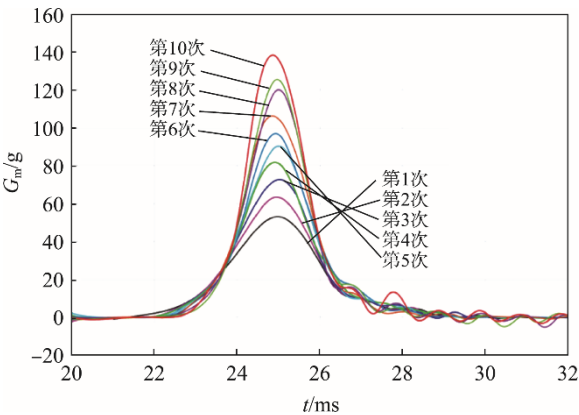


图 2 产品临界速度试验对应的加速度-时间响应曲线
Fig.2 Acceleration-time response curve corresponding to product critical velocity test

2.2 产品临界加速度冲击试验

2.2.1 产品第 1 次临界加速度冲击试验

参考矩形波作为脉冲激励进行临界加速度冲击试验可知,速度变化量选取的试验参考范围为 $1.57\Delta v_c\sim 2\Delta v_c$ ^[12],因此,选择第 1 次冲击的速度变化量为 4.5 m/s^2 且试验中速度变化量的误差范围控制在 5% 以内。

产品第 1 次临界加速度冲击试验数据见表 2。依据试验步骤以及表 2 最后 2 行数据可以得到该产品第 1 次临界加速度冲击试验的值为 $G_{m1}=72.93g$ 。

第 1 次临界加速度冲击试验中,产品损坏时的加速度-时间历程见图 3。

表 1 产品临界速度变化冲击试验数据
Tab.1 Data of product critical velocity variation shock test

临界加速度测量值 G_m/g	速度变化量 $\Delta v/(m\cdot s^{-1})$	波形垫数据			产品状态
		尺寸/mm	数量	材质	
53.17	1.39	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
63.69	1.53	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
72.73	1.65	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
81.73	1.76	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
91.25	1.87	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
97.56	1.94	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
106.12	2.03	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
121.65	2.14	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
124.84	2.22	260×260×5	1	羊毛垫	未损坏
136.07	2.31	260×260×5	1	羊毛垫	损坏

表 2 产品第 1 次临界加速度冲击试验数据
Tab.2 Data on the first critical acceleration shock test of products

临界加速度测量值 G_m/g	速度变化量 $\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	波形垫数据			产品状态
		尺寸/mm	数量	材质	
27.49	4.55	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	7	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	1		
33.23	4.63	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	7	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	4		
42.84	4.39	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	3		
		$260\times 260\times 15$	6	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	1		
45.7	4.67	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	6	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	4		
51.48	4.71	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	5	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	1		
56.8	4.57	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	5	羊毛垫	
		$260\times 260\times 5$	1		
62.29	4.43	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	5	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	4		
69.07	4.68	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	未损坏
		$260\times 260\times 5$	4		
		$260\times 260\times 15$	4	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	1		
76.78	4.62	$260\times 260\times 10$	4	海绵橡胶	损坏
		$260\times 260\times 5$	3		
		$260\times 260\times 15$	4	羊毛垫	
		$260\times 260\times 10$	1		

2.2.2 产品第 2 次临界加速度冲击试验

选取产品第 2 次临界加速度冲击试验的速度变化量为 6.5 m/s^2 ，将试验中速度变化量的误差范围控制在 5% 以内。

产品第 2 次临界加速度冲击试验数据见 3。根据上述试验步骤及表 3 最后 2 行数据可知，该产品第 2 次临界加速度冲击试验的值 $G_{m2}=65.06g$ 。

在第 2 次临界加速度冲击试验中，产品损坏时的加速度-时间历程见图 4。

根据上述试验，得到烤箱的破损情况见图 5，因此，在后续结构设计中，需对角、棱以及内胆进行更合理的缓冲设计。

依据试验步骤，结合表 1—3 中的试验数据可知，该产品的临界速度变化量值 $\Delta v_c=2.27 \text{ m/s}$ ，第 1 次和

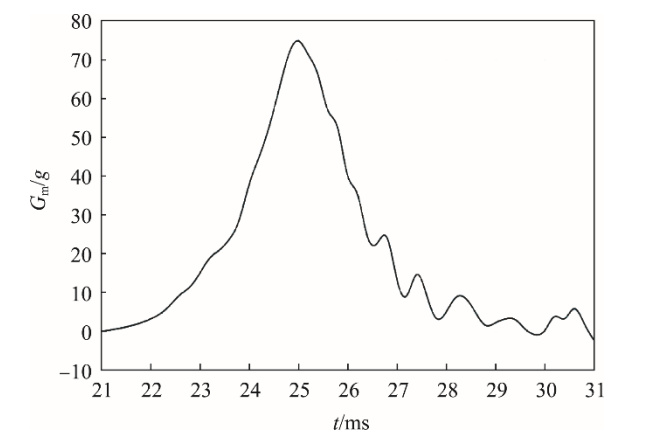


图 3 第 1 次临界加速度试验产品破损时对应的
加速度-时间响应曲线

Fig.3 Acceleration-time response curve corresponding to
product damage of the first critical acceleration test

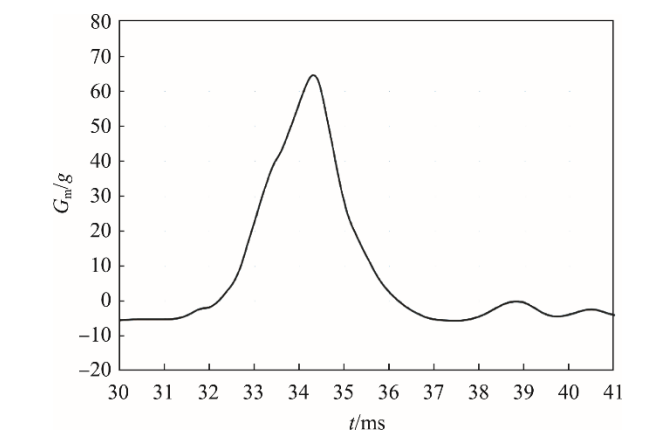


图 4 第 2 次临界加速度试验产品破损时对应的
加速度-时间响应曲线

Fig.4 Acceleration-time response curve corresponding to
product damage of the second critical acceleration test

表 3 产品第 2 次临界加速度冲击试验数据

Tab.3 Date on the second critical acceleration shock test of products

临界加速度测量值 G_m/g	速度变化量 $\Delta v/(m \cdot s^{-1})$	波形垫数据			产品状态
		尺寸/mm	数量	材质	
34.55	6.75	260×260×10	4	海绵橡胶	未损坏
		260×260×5	3		
		260×260×5	5	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	
		260×260×5	4		
43.11	6.53	260×260×10	4	海绵橡胶	未损坏
		260×260×5	2		
		260×260×5	4	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	
		260×260×5	4		
51.41	6.44	260×260×10	4	海绵橡胶	未损坏
		260×260×5	2		
		260×260×5	4	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	
		260×260×5	2		
59.18	6.68	260×260×10	4	海绵橡胶	未损坏
		260×260×5	1		
		260×260×5	4	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	
		260×260×5	1		
62.7	6.39	260×260×10	4	海绵橡胶	未损坏
		260×260×5	1		
		260×260×5	3	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	
		260×260×5	1		
67.42	6.61	260×260×10	4	海绵橡胶	损坏
		260×260×5	1		
		260×260×5	3	橡胶板	
		260×260×10	8	羊毛垫	



a 角变形

b 内胆凹陷

图 5 产品破损情况

Fig.5 Product breakage

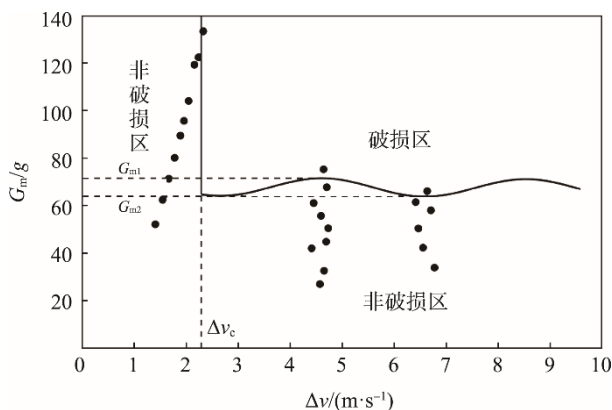


图 6 产品破损边界曲线

Fig.6 Product damage boundary curve

第 2 次临界加速度冲击试验的值分别为 $G_{m1}=72.93g$, $G_{m2}=65.06g$ 。与此同时,通过对比第 1 次和第 2 次临界加速度冲击试验的值,可以得到该产品的极限加速度的值 $G_{jx}=65.06g$ 。进一步依据式(1)可以得到该产品的脆值 $G=52g$ 。

3 结语

通过使用半正弦脉冲激励来完成产品机械冲击脆值的测定,获得了以临界速度变化量、临界加速度值、半正弦冲击脉冲形状为基本评价量的跌落破损边界曲线,以及产品机械冲击脆值。其优势在于该试验结果能够可靠反映产品的破损边界及冲击脆值,为下一步运输包装设计提供数据支持。与此同时,通过该试验得到的产品损坏情况可为缓冲结构设计提供参考依据。该试验也可同类产品破损边界曲线的测定提供试验参考。

参考文献:

[1] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Prac-

tice[R]. Monterey Research Laboratory, 1968.

- [2] 宋宝丰,袁志庆. 缓冲包装设计中构建破损边界曲线的新途径[J]. 包装学报, 2013, 5(3): 46—50.
SONG Bao-feng, YUAN Zhi-qing. A New Way of Constructing Damage Boundary Curve in Cushioning Packaging Design[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 46—50.
- [3] 宋宝丰. 产品脆值理论与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 39—62.
SONG Bao-feng. Product Fragility Theory and Application[M]. Changsha: NUDT Publish House, 2002: 39—62.
- [4] 郭彦峰,付云岗,许文才,等. 缓冲包装件的运输包装性能测试与评估技术[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 26—28.
GUO Yan-feng, FU Yun-gang, XU Wen-cai, et al. Performance Test and Evaluation Technology for Transport Packaging[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 26—28.
- [5] 张华良,顾祖莉,金国斌. 现代物流中商品运输包装动力可靠性[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 135—137.
ZHANG Hua-liang, GU Zu-li, JIN Guo-bin. Transport Package's Dynamic Reliability of Modern Logistics[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 135—137.
- [6] 彭国勋,郭彦峰,舒祖菊,等. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2014: 87—93.
PENG Guo-xun, GUO Yan-feng, SHU Zu-ju, et al. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2014: 87—93.
- [7] 胡长鹰. 缓冲包装系统跌落破损边界曲线研究[J]. 包装工程, 2001, 22(6): 4—7.
HU Chang-ying. Study on Dropping Damage Boundary Curve of Cushion Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(6): 4—7.
- [8] 王志伟. 现代包装力学[J]. 包装工程, 2002, 23(1): 1—5.
WANG Zhi-wei. Modern Packaging Mechanics[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(1): 1—5.
- [9] 王军,卢立新,王志伟. 产品破损评价及防护包装力

- 学研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 43—45.
WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Product Damage Evaluation and Protective Packaging Dynamics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 43—45.
- [10] 王军, 王志伟. 考虑易损件的正切型包装系统冲击破损边界曲面研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 166—167.
WANG Jun, WANG Zhi-wei. Damage Boundary Surface of a Tangent Nonl Near Packaging System with Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 166—167.
- [11] GOFF J W, PIERCE S R. A Procedure for Determining Damage Boundary[J]. Shock Vibration Bull, 1969, 40(6): 127—131.
- [12] ASTM-D 3332—99(2010), Standard Test Methods for Mechanical Shock Fragility of Products, Using Shock Machines[S].
- [13] 李志强. 包装冲击试验机专用虚拟仪器设计[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 70—72.
LI Zhi-qiang. Design of Virtual Instrument Used in Package Impact Testing Machine[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 70—72.
- [14] 白淑伟. 平板电视 EPS 缓冲垫优化研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014: 6—9.
BAI Shu-wei. Optimization of EPS Cushion for FPTV[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014: 6—9.
- [15] 田静敏, 黄秀玲. 包装件跌落冲击研究现状[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 199—203.
TIAN Jing-min, HUANG Xiu-ling. Status of Package Dropping Impact Research[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 199—203.
- [16] 汤伯森, 奚德昌. 包装动力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 44—61.
TANG Bo-sen, XI De-chang. Packaging Dynamics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 44—61.
- [17] 黄雪. 产品脆值的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 10—17.
HUANG Xue. The Research of Fragility[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2004: 10—17.
- [18] 汤伯森, 郝喜海, 江南, 等. 防护包装原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 228—232.
TANG Bo-sen, HAO Xi-hai, JIANG Nan, et al. Principle of Protective Packaging[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 228—232.