

基于 ANSYS 保温包装球壳模型的建立

郭晓娟, 钱 静

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 将实际保温箱尝试用不同球壳模型表达, 实现了三维热传递模型向一维模型的转换, 借助 ANSYS 热分析, 进行数值模拟, 分析了转换模型的保温时间及其与实际保温箱的相对误差。结果表明, 当箱体一个内表面接近正方形, 内尺寸最大值与最小值的比值小于 2 时, 采用与实际保温箱内体积相等、厚度相等转化而来的球壳模型, 最能真实反映实际保温箱的传热过程, 这为保温包装优化设计、降低包装成本提供了依据。

关键词: 保温箱; ANSYS 热分析; 球壳模型; 保温时间

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)05-0043-06

Spherical Shell Models for Insulating Packages Based on ANSYS

GUO Xiao-juan, QIAN Jing

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to realize the three-dimensional heat transfer calculating to one-dimensional, several different spherical shell models were developed. Numerical simulation was carried out based on ANSYS heat transfer analysis to analyze the heat preservation time of the model and the relative error between the model and practical insulating package. The results showed that spherical shell models can furthest reflect the heat transfer process of real insulating package when inside surface of package is close to square and the ratio of maximal size to minimal size of package is less than 2, in which the volume and the thickness of spherical shell model equals to that of the insulating package. The purpose of this research was to provide reference for optimal design of insulating package and to reduce packaging cost.

Key words: insulating container; thermal analysis of ANSYS; spherical shell model; heat preservation time

水产品、奶制品、速冻食品, 生物制药、试剂、人体器官移植、血液、鲜花等温度敏感性物品, 在运输过程中, 为了保证物品品质, 需要保温包装来阻止或延缓外部热量侵入包装内部。影响保温包装阻热效果的因素众多, 包括包装材料的种类、蓄冷剂种类、货物和包装容器几何形状、尺寸, 以及货物与包装容器的接触面积等^[1-2]。

保温包装中常见的保温容器是具有长、宽、高的三维几何体。对于这样的三维容器, 文献中大多采用一维平板模型, 或对不同边、角进行形状因子的加权进行热传递计算。这样的计算往往是在包装容器确定, 相变材料及用量有所约定的情况下, 对既定的保温包装进行保温时间的估算; 或者包装容器既定, 运输要求的保温时间已知, 对蓄冷剂用量进行估

算^[3-4]。而在保温包装的设计过程中, 希望在被保护的产品确定的情况下, 完成对保温容器的三维尺寸设计和相变材料及用量的选取, 达到要求的保温时间。由保温容器的三维立体特征可联想到同样具有立体特征, 却有一维热传递计算模式的球壳模型, 如果寻找到适合的立体—球壳模型转换方式, 阻热包装的初设计可以很快得以解决。钱静在传热学基础上得到了三维模型向球壳模型转化的数学解析表达式, 并通过试验论证了解析表达式的正确性^[5]。但三维立体模型转化为球壳模型存在一定的条件限制, 笔者旨在寻找三维模型的边长尺寸比例在多大范围内, 立体模型向球壳模型的转化是可行的。运用有限元分析软件 ANSYS, 分别对实际保温箱和通过不同转换方法得到的球壳模型进行分析, 比较各模型保温时间及其

收稿日期: 2010-11-05

作者简介: 郭晓娟(1985—), 女, 河南人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

与实际保温箱的相对误差,从中找出三维立体模型转化为球壳模型的最佳方法,同时重点分析讨论三维立体模型向球壳模型转化的适用范围。

1 保温箱实体转换为球壳模型的几种方法

假设实际保温箱的长×宽×高为 $L \times W \times H$,厚度为 V_x ,转化成球壳模型时,定义球壳的内径为 r_i ,外径为 r_o ,示意图见图 1。

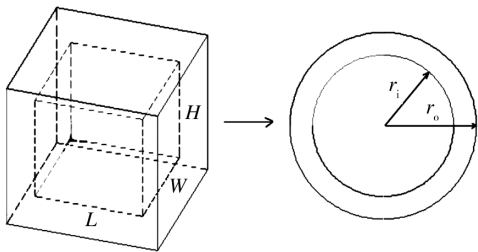


图 1 实际保温箱转换为球壳模型
Fig. 1 Transform of cubic insulating package into spherical shell model

实际保温箱与球壳模型转化时,可以采用多种方法,比如假定两者具有相同的内、外体积或者相同的内、外表面积,具体如下:

1) 球壳模型 1 与立方体模型内外体积分别相等,则球壳模型内、外半径计算公式为:

$$r_i = \sqrt[3]{LWH / (\frac{4}{3}\pi)}$$

$$r_o = \sqrt[3]{(L+V_x)(W+V_x)(H+V_x) / (\frac{4}{3}\pi)}$$

2) 球壳模型 2 与立方体模型内体积、厚度相等:

$$r_i = \sqrt[3]{LWH / (\frac{4}{3}\pi)}$$

$$r_o = r_i + V_x$$

3) 球壳模型 3 与立方体模型外体积、厚度相等:

$$r_i = r_o - V_x$$

$$r_o = \sqrt[3]{(L+V_x)(W+V_x)(H+V_x) / (\frac{4}{3}\pi)}$$

4) 球壳模型 4 与立方体模型内外表面积分别相等:

$$r_i = \sqrt{(LW+WH+HL)/(2\pi)}$$

$$r_o =$$

$$\sqrt{[(L+V_x)(W+V_x)+(W+V_x)(H+V_x)+(H+V_x)(L+V_x)]/(2\pi)}$$

5) 球壳模型 5 与立方体模型内表面积、厚度相等:

$$r_i = \sqrt[3]{(LW+WH+HL)/(2\pi)}$$

$$r_o = r_i + V_x$$

6) 球壳模型 6 与立方体模型外表面积、厚度相等:

$$r_i = r_o - V_x$$

$$r_o =$$

$$\sqrt{[(L+V_x)(W+V_x)+(W+V_x)(H+V_x)+(H+V_x)(L+V_x)]/(2\pi)}$$

2 模型假设

暂不考虑被保护产品及其热特性对整个模型热传递的影响,假设保温箱内充满固体冰。保温箱在运输过程中,由于外界的高温,箱内冰块逐步融化,由固体状态慢慢转变为固-液共存的冰水混合物,等完全融化为水后,保温箱继续吸热,温度急剧上升。该过程伴随着复杂的热传导和对流传热的现象,以及相变界面的移动等。为分析方便起见,对该模型进行如下假设:假设保温材料各向同性;忽略相变发生过程中固-液间自然对流;假设冰块与保温箱之间是紧密贴合,之间不存在对流、辐射等现象;假设外界通过传热进入包装容器内的热量全部被冰吸收。

3 运用 ANSYS 求解保温时间实例

ANSYS 进行热分析计算的基本原理是把所处理的对象首先划分成有限个单元(每个单元包含若干节点),然后根据能量守恒原理求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的热平衡方程,由此计算各节点温度值^[6]。

假设保温箱内尺寸 100 mm×100 mm×100 mm,厚度为 $V_x=20$ mm,箱体与外界环境间对流换热系数设为 5 W/(m²·℃)。保温箱材料为发泡聚苯乙烯,其导热系数 $k=0.034$ W/(m·K),密度为 $\rho=30$ kg/m³^[5]。固体冰的热性能参数^[6]见表 1。

表 1 固体冰的热性能参数

Tab.1 Thermal parameter of solid ice

温度 /℃	导热系数 /(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	密度 /(kg·m ⁻³)	焓 /(J·m ⁻³)
-10	0.57	900	0
-1	0.57	900	3.78×10 ⁷
0	0.57	1000	7.98×10 ⁷
10	0.57	1000	1.22×10 ⁸

定义单元类型 Solid70,建立几何模型。划分网格时,网格尺寸定义为 0.005 m。加载条件:保温箱内冰块的初始温度为-1℃,外界环境温度为 50℃。求解时间定为 24 000 s,最小步长为 30 s,最大步长为 100 s。进入数值模拟求解。以模型体对角线交点,即节点(0.05,0.05,0.05)为参考点,0℃为临界温度,该处节点融化所需时间最长,即该点温度上升至 0℃所需时间最长。当该点温度到达 0℃以上时,认为保温包装失效。求解结束之后,进入 POST26 处理器,提取节点(0.05,0.05,0.05)在整个分析过程中温度随时间的变化曲线,见图 2。

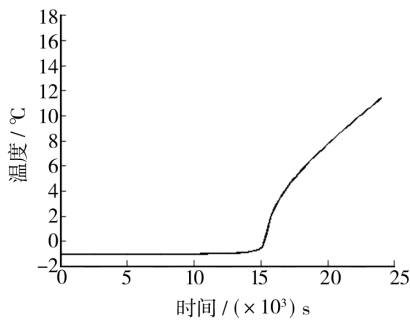


图 2 箱体中心点温度变化曲线
Fig.2 Temperature of the middle point
in the cubic package case

进入 POST1 处理器,读取中间节点在 15 000 s 附近时间点的准确温度,最终确定在 15 250 s 时刻,中间节点处温度为 0.016 464℃。由此确定此保温箱保温时间为 15 250 s。

4 转换误差及影响因素分析

保温材料 EPS 的导热系数 $k=0.034\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,密度 $\rho=30\text{ kg}/\text{m}^3$ 。固体冰的热性能参数采用上述实例中参数不变。箱体与外界环境间对流换热系数设为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$ 。保温箱内冰块的初始温度为-1℃,外界环境温度为 50℃,恒温。

4.1 立方体保温箱尺寸对转换误差的影响

选取的立方体保温箱参数见表 2,箱体厚度相等,均为 $V_x=20\text{ mm}$ 。按照计算公式转化成球壳模型的内、外半径见表 2。

在具体尺寸的基础上,分别用 ANSYS 建模,记录各模型的保温时间,然后计算各球壳模型相对于立方体模型的误差,数据见表 3。

从表 3 可以看出,随着立方体保温箱边长的增加,无论是立方体模型,还是各球壳模型,保温时间均明显变长,这是由于相变材料用量增加的缘故。由表 2 可知,球壳模型 1 的内、外半径差值即球壳厚度,小

表 2 立方体保温箱和各球壳模型尺寸

Tab.2 Size of cubic insulating package and different spherical shell models

边长 /mm	模型 1		模型 2		模型 3		模型 4		模型 5		模型 6	
	r_i	r_o	r_i	r_o	r_i	r_o	r_i	r_o	r_i	r_o	r_i	r_o
50	31	43	31	51	23	43	35	48	35	55	28	48
100	62	74	62	82	54	74	69	83	69	89	63	83
150	93	105	93	113	85	105	104	117	104	124	97	117
200	124	137	124	144	117	137	138	152	138	158	132	152
250	155	168	155	175	148	168	173	187	173	193	167	187

表 3 实体保温箱和各球壳模型保温时间及相对误差

Tab.3 Heat preservation time and error between cubic insulating package and different mathematic models

立方体模型		模型 1		模型 2		模型 3		模型 4		模型 5		模型 6	
边长	时间	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差
/mm	/s	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%
50	5090	4830	-5.1	5460	7.3	3385	-33.5	5950	16.9	6720	32.0	4670	8.3
100	15250	14050	-7.9	16455	7.9	13265	-13.0	17245	16.9	19400	27.2	16890	10.8
150	27525	25950	-5.7	30575	11.1	26780	-2.7	31525	14.5	36380	32.2	32720	18.9
200	42870	41265	-3.7	47725	11.3	43660	1.8	49430	15.3	55720	30.0	52495	22.5
250	60810	58325	-4.1	66435	9.3	62530	2.8	70175	15.4	78900	29.7	74730	22.9

于假设实际保温箱厚度 20 mm,故表中保温时间均小于对应立方体模型的值,误差均为负值,即保温时间低于实际水平,表明壁厚是保温设计中的重要参数;球壳模型 4 虽然壁厚小于实际保温箱的厚度,但模型采用的转换方式使相变材料(冰)的使用量比实际大,误差仍为正值,即保温时间比实际长,说明相变材料使用量是保温设计中的另一重要参数。将表 3 中各球壳模型误差数据在 Excel 中处理,得到图 3。

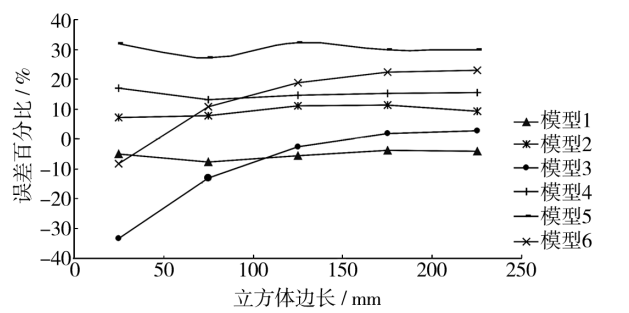


图 3 立方体保温箱与各球壳模型之间的相对误差
Fig. 3 Error between cubic insulating package and different mathematic models

从图 3 可以看出,模型 3 和模型 6 的误差值有从小到大、从负到正的变化过程,意味着对于不同尺寸的实际保温箱,如果按照模型 3 和 6 的计算方法来转化成球壳模型,其误差值很不稳定,不能真实反映实际保温箱的传热过程。模型 4 和 5 的误差值始终大于相应点处模型 1 和 2 的误差,故排除。模型 1 的误差值稳定在-10%左右,模型 2 的误差值也较稳定,在 10%左右。

4.2 保温箱长、宽、高比值对转换误差的影响

为方便研究,现假设保温箱的一个面为正方形,内尺寸为:高×宽=150 mm×150 mm,厚度取 $V_x=20$ mm。对保温箱的长取不同的值,研究不同长、宽、高比值条件下,实际保温箱转化成各球壳模型的可行性。实体保温箱与转化成的各球壳模型的保温时间和相对误差见表 4。

在表 4 的基础上,经过数据处理,得到的各球壳模型误差折线图见图 4。

从图 4 可以看出,当箱体一个面是正方形,边长最大值与最小值的比值不超过 2 时,每个球壳模型的

表 4 实体保温箱和各球壳模型的保温时间及相对误差

Tab. 4 Heat preservation time and error between rectangular insulating package and different spherical shell models

保温箱			模型 1		模型 2		模型 3		模型 4		模型 5		模型 6	
边长	长	时间	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差	时间	误差
比值	/mm	/s	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%	/s	/%
1:1:1	150	27 525	25 950	-5.7	30 575	11.1	26 780	-2.7	31 525	14.5	36 380	32.2	32 720	18.9
1.2:1:1	180	30 145	28 580	-5.2	33 690	11.8	29 660	-1.6	35 150	16.6	39 730	31.8	36 405	20.8
1.5:1:1	225	33 040	31 930	-3.4	37 920	14.8	33 745	2.1	40 215	21.7	45 405	37.4	41 975	27.0
1.8:1:1	270	34 995	35 560	1.6	41 385	18.3	37 505	7.2	44 380	26.8	50 090	43.1	46 585	33.1
2:1:1	300	35 730	37 450	4.8	43 660	22.2	39 700	11.1	47 630	33.3	53 715	50.3	50 095	40.2

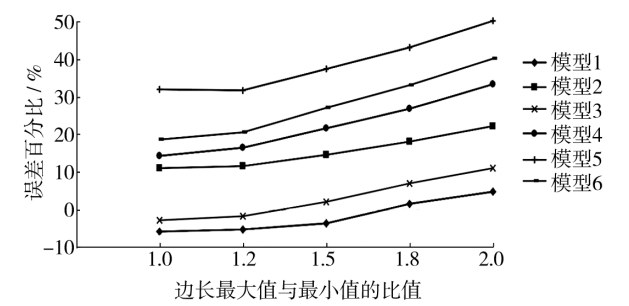


图 4 不同边长比值的保温箱与转化得到的各球壳模型之间的相对误差
Fig. 4 Error between rectangular insulating package and different spherical shell models

其中模型 5、6 和 4 的误差始终在其他球壳模型之上,相对而言模型 2、3 和 1 误差则较小。

4.3 保温箱厚度对转换误差的影响

通过以上分析可知,无论实体保温箱是立方体,还是具有不同的长、宽、高值,在转化成球壳模型时,模型 1、2 和 3 都比模型 4、5 和 6 误差值要小,更能真实反映实际保温箱的传热过程。故以下讨论摒弃模型 4、5 和 6,主要讨论模型 1、2 和 3,从中比较找出更好的模型。

4.3.1 尺寸不同的立方体保温箱

上述分析讨论了 20 mm 厚,边长从 50 mm 到 250 mm 的正立方体模型转化成各球壳模型的保温

误差都随着长、宽、高比值的增加,呈缓慢上升趋势。

时间和误差,为了使讨论更全面、更准确,加入边长 300,350,400 和 450 mm,厚度均为 20 mm 的 4 个立方体模型,同时保持上述立方体模型内尺寸不变,将厚度增加到 $V_x = 30$ mm,分别计算转化成的各球壳模型的内、外径尺寸,运用有限元软件 ANSYS 进行热分析,得到其保温时间并计算误差。各模型误差数据点折线图见图 5。

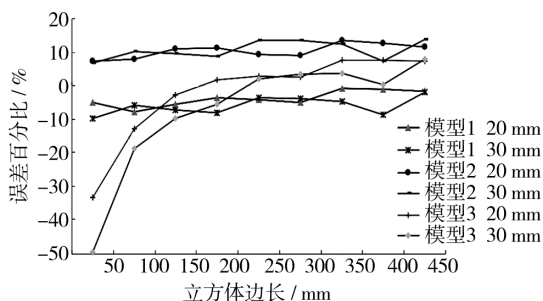


图 5 厚度不同的立方体模型与各球模之间相对误差的综合比较

Fig. 5 Comparison of error between cubic insulating packages of different thickness and mathematic models

从图 5 可以看出,模型 3 的误差值出现了由负到正的过程,误差值不稳定、离散性较大,不适宜以其作为衡量模型好坏的标准。模型 1 和 2 的误差并未随着正立方体边长的增加出现较大波动。模型 2 的误差值稳定在 10% 左右,模型 1 的误差值稳定在 -10% 左右。因此模型 1 和 2 比模型 3 更具有优势,能近似反映实际保温箱的传热过程。

另外比较厚度分别为 20 和 30 mm 模型间误差数据,时而 20 mm 厚模型的误差值较大,时而 30 mm 厚模型的误差值较大。这意味着厚度对模型转换产生的误差并没有规律可循,误差大小是厚度和立方体保温箱边长尺寸共同作用的结果。

4.3.2 不同长、宽、高比值的保温箱

以上讨论了保温箱长、宽、高比值最大为 2:1:1 的各模型误差,为了进一步探讨边长比值对误差的影响,将其扩大到 4:1:1;将厚度分别为 20 和 30 mm,长、宽、高比值不同的保温箱实体模型转化成球壳模型,产生的误差值见图 6。

从图 6 可知,模型最大边长与最小边长比值越大,保温箱实体模型转换成球壳模型产生的误差值越大;当保温箱边长比值大于 2:1:1 时,模型 1 和 2 的误差值均呈直线上升趋势。为了合理控制误差,边长比值应控制在 2:1:1 范围内。当边长比值超过

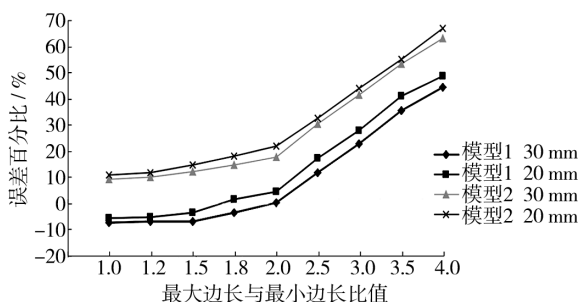


图 6 厚度不同、边长比值不同的保温箱各球壳模型之间的相对误差

Fig. 6 Error between rectangular insulating packages of different thickness and size ratios and spherical shell models

2:1:1 时,无论哪个球壳模型都不能客观反映实体保温箱的传热过程。此时就需要寻求其他模型,解决边长比值较大时,保温包装箱设计问题。

聚焦模型 1 和模型 2 边长比值小于 2 部分的曲线段,模型 2 的误差始终为正值,在 10%~20% 之间,且 30 mm 的误差值小于相应模型 20 mm 的误差值。对于模型 1,无论是 20 mm 还是 30 mm 厚,模型转化时产生的误差值都是有正有负。误差为负值时,20 mm 厚的误差较小;但当误差达到正值以后,30 mm 厚的模型误差反而比 20 mm 相应的模型要小。当误差为负值时,意味着球壳模型的保温时间比实际保温箱的保温时间要短,如果按模型 1 转换方法来计算,实体保温箱内温度在到达目的地之前已经超出物品所允许的温度范围,达不到保护物品的目的。综合比较,模型 2 的转化方法最佳,既能控制误差在合理范围内,又能真实反映实际保温箱的传热过程。

5 结论

在由计算公式得到球壳模型的基础上,采用 ANSYS 热分析,利用有限元法数值模拟各模型的传热过程,得其保温时间,并对误差进行计算得到:

1) 实际保温箱转化为球壳模型有一定的限制,即当一个面近似为正方形时,最大边长与最小边长的比值不应超过 2,否则误差过大。

2) 6 种模型中,模型 2 采用的方法,与实体保温箱保温时间之间误差较小,最能真实反映实际保温箱的传热过程。

3) 采用实体模型与球壳模型内体积相等、厚度相等转化而来的球壳模型,增加厚度有助于减小误

差,但效果并不显著。

所讨论的模型外界环境温度都是恒定不变的,而实际运输过程中环境温度不是一成不变的,所以今后还应讨论在温度变化情况下模型 2 的适用性。另外模型 2 必须在最大边长与最小边长的比值不超过 2 时方可使用,对于超过此范围的实体保温箱,还应寻求其他模型来更准确地描述实际保温箱的传热过程,从而为保温包装设计奠定基础。

参考文献:

- [1] CHOI Seung-jin, BURGESS Gary. Practical Mathematical Model to Predict the Performance of Insulating Packages [J]. Packag Technol Sci, 2007, 20: 369—380.
- [2] SINGH S P, BURGESS G, SINGH J. Performance Com-

parison of Thermal Insulated Packaging Boxes, Bags and Refrigerants for Single-parcel Shipments [J]. Packag Technol Sci, 2008, 21: 25—35.

- [3] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two Methods for Calculating the Amount of Refrigerant Required for Cyclic Temperature Testing of Insulated Packages [J]. Packag Technol Sci, 2007, 20: 113—123.
- [4] BURGESS G. Practical Thermal Resistance and Ice Requirement Calculations for Insulating Packages [J]. Packag Technol Sci, 1999, 12: 75—80.
- [5] QIAN Jing. Mathematical Models for Insulating Packages and Insulating Packaging Solutions [D]. Memphis, TN: University of Memphis, 2010.
- [6] 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.

(上接第 31 页)

下一步工作就是增加相移装置,测出缺陷的三维形貌,研究灵敏度,对不同的轻工业包装产品进行进一步测试和研究。

参考文献:

- [1] 邵文全,李砚明,孟宪文,等.脱胶缺陷对蜂窝板侧压强度的影响[J].包装工程,2008,29(12):59—61.
- [2] 计欣华,邓宗白,鲁阳.工程实验力学[M].第2版.北京:机械工业出版社,2010.
- [3] HUNG Y Y. A Speckle-Shear Interferometer: A Tool for Measuring Derivatives of Surface Displacement [J]. Opt Commun, 1974, 11(2): 132—135.
- [4] 陈育彬,黄道平,曾启荣,等.基于测度贴近度的电子剪切散斑轮胎检测[J].微计算机信息,2006,22(19):109

—111.

- [5] 徐驰,王喜顺,陈育彬.剪切电子散斑干涉检测轮胎中的图像缺陷[J].微计算机信息,2007,23(12):285—286.
- [6] 邹广平,芦颀,王微微.电子剪切散斑技术在木材无损检测中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(4):357—361.
- [7] 洪友仁,何浩培,何小元.剪切散斑:一种光学测量技术及其应用[J].实验力学,2006,21(6):667—688.
- [8] 刘宝会,秦玉文,曲日,等.宽音频扫描加载的电子剪切散斑技术在多层粘接板结构无损检测中的应用[J].实验力学,2003,18(2):229—233.
- [9] 金观昌.计算机辅助光学测量[M].第2版.北京:清华大学出版社,2007.

(上接第 37 页)

3) 当 N 取 1 时,多次跌落情形下的加速度值回归于传统的产品脆值。

参考文献:

- [1] 杨志.论日用陶瓷产品的包装设计[J].科技简报,2003,36(9):29—31.
- [2] 王春雨.陶瓷包装现状及改进建议[J].佛山陶瓷,2002,65(8):25—26.
- [3] 王伟.我国陶瓷包装的现状与发展思路[J].中国包装,2002(1):40—41.
- [4] 王晓平,黄灵仙,刘启顺,等.陶瓷工艺品包装的力学建模和设计方法研究[J].包装工程,2006,27(4):33—35.
- [5] 宋海燕.运输包装理论与技术发展动态[J].包装工程,2005,26(3):108—110.

- [6] 徐人平.产品脆值的置信度研究[J].理化检验—物理分册,2002,38(10):424—426.
- [7] 周明砚,张峻岭.缓冲包装设计理论的发展及方向[J].包装工程,2005,26(2):70—71.
- [8] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Test Procedure [R]. Monterey Calif: Monterey Research Laboratory, Inc, 1968.
- [9] 吴浩然,王振林,应祖光,等.半正弦波冲击时立方非线性产品包装损坏边界曲线[J].包装工程,1996,17(4):5—8.
- [10] TOTTEN T L, BURGESS G J, SINGH S P. The Effects of Multiple Impacts on the Cushioning Properties of Closed-Cell Foams [J]. Packaging Technology & Science, 1990, 3: 117—122.