

冷冻食品的复合式泡沫包装箱设计研究

夏自由*, 王章苹, 李 雪

(长沙师范学院信息科学与工程学院, 长沙 410100)

摘 要: **目的** 设计一种能提高结构强度的复合式泡沫包装箱。**方法** 将由护边套和护板构成的护架套装在泡沫包装箱的外部, 组合成复合式泡沫包装箱, 通过静态压缩实验和跌落实验, 对比测试普通泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的抗压强度、抗破损性能。**结果** 复合式泡沫包装箱单体抗压强度 1959.29 N, 普通泡沫包装箱单体抗压强度 1557.22 N; 对于交错堆码条件下, 抗压强度由普通泡沫包装箱的 1039.18 N 提升到复合式泡沫包装箱的 1978.56 N。采用护架后, 箱体载物面跌落破损高度由 800 mm 提高到 1400 mm, 棱跌落破损高度由 600 mm 提高到 1200 mm, 角跌落破损高度由 400 mm 提高到 1000 mm。**结论** 采用护架的复合式泡沫包装箱, 提升了箱体结构强度、耐破损性能, 解决了多层堆码箱体压损问题, 降低了箱体的破损率, 提高了包装箱重复使用率。

关键词: 聚苯乙烯; 泡沫包装箱; 复合式包装; 冷冻包装; 结构强度

Study on composing foam packing box used for frozen food

XIA Zi-You*, WANG Zhang-Ping, LI Xue

(Information and Engineering Department, Changsha Normal University, Changsha 410100, China)

ABSTRACT: Objective To design a composing foam packaging box that can improve strength of structure. **Methods** Putting the protective frame composed of the edge guard and the guard plate on the outside of the foam packing box, a composite foam packing box was formed. Through static compression experiment and drop experiment, the compressive strength and damage resistance performance of ordinary foam packaging boxes and composite foam packaging boxes were compared and tested. **Results** The compressive strength of a composing foam packing box was 1959.29 N, and the non-sheath foam packing box was 1557.22 N. Under the condition of staggered stacking, the compressive strength was increased from 1039.18 N of ordinary foam packing box to 1978.56 N of composite foam packing box. After adopting the protection frame, the falling damage height of the carrier surface of the box body is increased from 800 mm to 1400 mm, the falling damage height of the edge is increased from 600 mm to 1200 mm, and the falling damage height of the Angle is increased from 400 mm to 1000 mm. **Conclusion** The composite foam packaging box with protective frame improves the structural strength and damage resistance of the box body, solves the problem of pressure loss of multi-layer stacking boxes, reduces the damage rate of the box body, and increases the reuse rate of the box.

KEY WORDS: expanded polystyrene; foam packing box; composing packaging; frozen pack; strength of structure

*通讯作者: 夏自由, 硕士, 主要研究方向为包装结构设计、包装测试。E-mail: 31922916@qq.com

*Corresponding author: XIA Zi-You, Master, Changsha Normal University, No.9 Teli Road, Xingsha Town, Changsha 410100, China. E-mail: 31922916@qq.com

1 引言

随着我国消费者的生活水平不断提高, 冷冻、冷藏食品的需求量也日益增加, 比如冷冻海鲜、冷冻肉品等。聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)泡沫包装箱由于具有导热系数小、耐水、耐低温、质量轻、缓冲性能好等优点, 广泛应用于冷冻、冷藏产品的保鲜运输, 但 EPS 泡沫包装箱存在结构强度低, 易破损, 不适合多层堆码, 不适合打包机自动打包, 不适合图文信息印刷等缺点^[1-4]。

为了解决泡沫包装箱结构强度低的问题, 已提出过多种方案^[5-10], 比如泡沫-瓦楞纸板复合式泡沫包装箱, 但这种包装箱在实际应用中受到较大的限制, 主要原因是冷冻、冷藏包装极易产生冷凝水使瓦楞纸箱受潮, 普通瓦楞纸箱的强度随着纸张水分的增加大幅度下降, 而高抗水性能的瓦楞纸板成本高昂。

鉴于此, 本研究采取复合式泡沫包装箱的形式来提高泡沫包装箱的结构强度, 通过在泡沫包装箱上套装护架, 提高泡沫包装箱的抗压强度和耐破损度, 解决冷冻食品泡沫包装箱运输过程中堆码高度受限制, 以及包装箱易破损问题, 提高运输效率, 降低泡沫箱破损率, 促进包装产业绿色、环保、节能目标的实现。

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

本研究采用 EPS 泡沫包装箱, 尺寸为: 外尺寸长、宽高: 410 mm×270 mm×190 mm, 内尺寸 370 mm×230 mm×150 mm, 厚度为 20 mm, 来自长沙县方南泡沫厂。护架材质为聚氯乙烯板材, 板材厚度 2 mm, 来自佛山市希禹塑料有限公司。

KYJ-10K 纸箱抗压实验仪(济南三泉中石实验仪器有限公司); DL150 跌落试验机(北京西科创业机电设备有限责任公司)。

2.2 复合式泡沫包装箱设计

本研究设计出一种泡沫包装箱的护架, 护架由 2 块护边套、2 块护板构成。护架套在泡沫箱上构成复合式泡沫包装箱, 其结构如图 1 所示。护边套由多块 L 型护边组合在一起构成, 护边套上下端面开有插入护板的插槽, 护板通过一端插入插槽中, 另一端封闭。

复合式泡沫包装箱的作业方式: 泡沫包装箱盖好盖板后, 将左右护边套套在泡沫包装箱上, 然后插入上下护板到插槽中, 形成一个护架整体, 泡沫包装箱笼入其内。作业方式如图 2 所示。

2.3 实验方法

为了鉴定复合式泡沫包装箱的性能, 通过对比实验

的方法来测定。实验样品分为 2 组, 一组是无护架的泡沫包装箱, 另一组是套有护架的复合式泡沫包装箱, 分别按照实验方案进行对比实验, 测试其性能。每种实验方案测试的样本数据为 5 个。

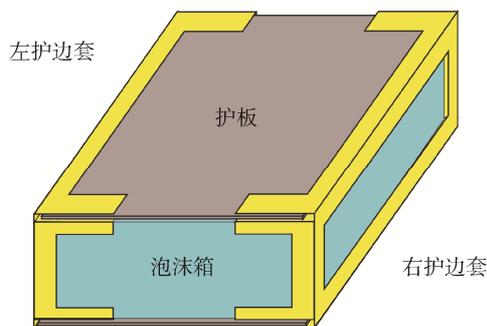


图 1 复合式泡沫包装箱结构示意图

Fig.1 Structure of composing foam packaging box

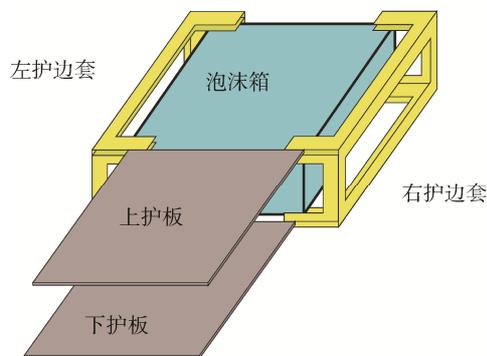


图 2 复合式泡沫包装箱作业示意图

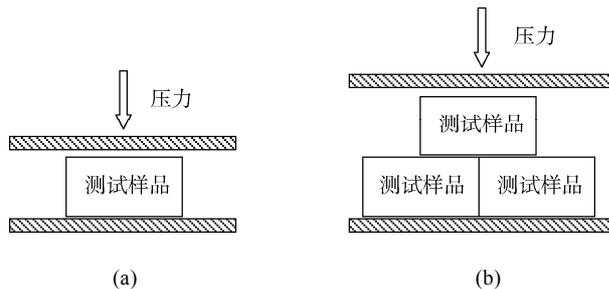
Fig.2 Installation of composing foam packaging box

实验方案的设计主要参照物流过程中泡沫包装箱的受损环境条件。物流过程中, 导致泡沫包装箱破损的原因主要有: 多层堆码导致底层的包装箱被压溃; 箱内物体过重, 运输时上下振动损坏包装箱; 装卸、搬运时箱体底板破损; 运输过程中, 前后晃动导致箱体板连接处断裂; 箱体棱边或面板受碰撞破损^[11,12]。本研究设计的实验方案是静态压缩实验和跌落实验, 模拟物流过程中泡沫包装箱破损过程。

2.3.1 静态压缩实验

包装箱的堆码高度主要与包装箱的抗压强度相关, 抗压强度可采用静态压缩实验测量获得。参照国家标准 GB/T 4857.4—2008《包装 运输包装件基本试验 第 4 部分 采用压力试验机进行的抗压和堆码试验方法》^[13], 测试无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的最大抗压强度。测试样品箱为空箱, 测试的样本数据为 5 个。

包装箱的堆码性能与堆码方式相关, 常见的堆码方式有重叠堆码和交错堆码。本实验方案中, 采用单包装箱静态压缩实验模拟重叠堆码环境条件, 双层包装箱交错堆码压缩实验模拟交错堆码环境条件, 分别测试泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的抗压强度^[14-16]。实验方案设计如图 3 所示。



注: a 单包装箱压缩实验方案, b 交错堆码压缩实验方案。

图 3 静态压缩实验方案

Fig.3 Experimental scheme of static compression

2.3.2 跌落实验

泡沫包装箱装冷冻物品时, 质量较大, 由于泡沫板的结构强度较低, 运输过程中受到上下振动、前后晃动、碰撞等各种冲击, 很容易损伤^[17-19]。本研究中, 采用跌落实验来模拟包装箱损伤的环境条件, 测量无护架泡沫包装箱与复合式泡沫包装箱的抗损伤性能。

跌落实验按照国家标准 GB/T 4857.5—92《包装 运输 包装件 跌落试验方法》^[20]进行。实验方案设计为: 箱体质量固定, 跌落高度变化, 定性测试无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的抗损伤性能。模拟冷冻物品物流过程, 样品箱内装 3 kg 整块冻肉, 从 0.4 m 高度开始进行跌落实验, 以 0.2 m 为间隔逐渐提升跌落高度, 观察跌落箱体后的受损情况, 每次实验的样本数据为 5 个。

跌落实验方案设计中, 根据国家标准 GB4857.5—92, 分别进行面跌落测试、棱跌落测试、角跌落测试。对于面跌落测试, 由于测试目的是包装箱的耐破损性能, 而不是泡沫的缓冲性能, 需要在测试箱体底面粘贴一与箱体截面同大小的泡沫条框, 以便箱体着地时, 箱体底板中间落空, 模拟包装箱在未装满物品条件下的抗上下冲击性能。泡沫

条框的厚度与箱体泡沫板厚度一致。

3 结果与分析

3.1 重叠堆码条件下箱体的抗压强度

对单个箱体样品进行静态压缩实验, 获得的实验数据如表 1 所示。无护架泡沫包装箱的抗压强度平均值为 1557.22 N, 变形量为 34.64 mm, 5 个样本的实验测量数据极差小, 与平均值的差值都在 2 个标准差范围内, 证明测试过程没有出现较大的差异, 实际情况也是如此, 5 个实验样品都表现为箱体长度方向的侧边被压溃断裂。复合式泡沫包装箱的抗压强度平均值为 1959.29 N, 变形量为 20.90 mm, 5 个实验样品都表现为护边套高度方向的 L 型护边压溃。

分析实验数据, 对于无护架的空泡沫箱, 水平重叠堆码时, 压力均匀分布在包装箱的 4 个侧面, 此时箱体的抗压强度最大, 其中箱体长度方向的侧面为薄弱点, 最先被压溃。当泡沫包装箱装满物体后, 由于箱内物体起一定的支撑作用, 箱体的抗压强度会提高。冷冻物体泡沫包装箱运输过程中, 经常出现冷冻物体解冻导致物体高度变低或结构强度下降, 其支撑作用减弱或消失, 对上层堆码的支撑作用转移到箱体上, 很容易将泡沫包装箱压溃。

对于复合式泡沫包装箱, 水平重叠堆码时, 护边套高度方向的 4 个 L 型护边起支撑作用, 笼内的泡沫包装箱受到的冲击压力较小。实验中, 首先被压溃的是护边, 产生的形变量小于无护架的泡沫箱体被压溃时的形变量, 因此, 笼内的泡沫包装箱体完好无损。护边被压溃后, 对泡沫箱体还是具有一定的保护作用, 其抗压强度大于无护架的泡沫包装箱。

3.2 交错堆码条件下箱体的抗压强度

对于无护架的泡沫包装箱, 交错堆码条件下的抗压强度低于单箱体, 如表 2 所示, 最大抗压强度平均值为 1039.18 N, 形变量为 43.34 mm。无护架的泡沫包装箱的压溃形式表现为: 两层泡沫包装箱接触处的盖板或底板断裂。对于复合式泡沫包装箱, 交错堆码条件下的抗压强度反而高于单箱体, 最大抗压强度平均值为 1978.56 N, 形变量为 38.45 mm。

表 1 单个箱体样品静态压缩抗压强度及形变量
Table 1 Compressive strength and deformation of single box

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	平均值	标准差
无护架泡沫包装箱	最大压溃力/N	1546.36	1557.34	1568.37	1551.58	1562.44	1557.22	7.76
	变形量/mm	34.99	35.21	34.69	33.74	34.59	34.64	0.50
复合式泡沫包装箱	最大压溃力/N	1959.24	1962.34	1957.78	1956.88	1960.23	1959.29	1.91
	变形量/mm	20.50	21.46	20.23	20.79	21.53	20.90	0.52

表 2 箱体样品交错堆码压缩抗压强度及形变量
Table 2 Compressive strength and deformation of staggered stacking boxes

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	平均值	标准差
无护架泡沫包	最大压溃力/N	1032.75	1046.87	1056.33	1024.19	1035.76	1039.18	11.23
装箱	变形量/mm	42.68	44.53	43.26	43.74	42.50	43.34	0.74
复合式泡沫包	最大压溃力/N	1983.52	1979.30	1968.71	1989.55	1971.73	1978.56	7.61
装箱	变形量/mm	38.29	37.84	39.53	39.15	37.43	38.45	0.79

交错堆码静态压缩实验中,无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱出现相反的实验结果,对实验过程进行力学分析。交错堆码时,上层泡沫包装箱的压力通过箱体侧板和底板传递到下层包装箱,同时受到相同大小的反作用力,如图 4 所示。

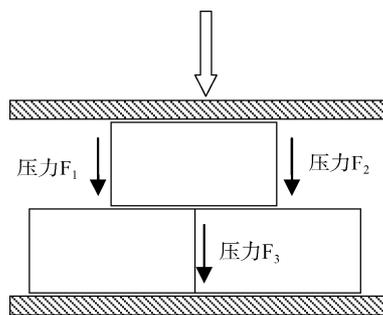


图 4 交错堆码压缩过程力学分析

Fig.4 Mechanical analysis on compression process for staggered stacking condition

F_1 、 F_2 为上层箱体侧板对下层箱体盖板的作用力, F_3 为上层箱体底板对下层箱体侧板的作用力。在压力 F_1 、 F_2 作用下,下层箱体盖板产生弯曲形变,同时上层箱体侧板产生压缩形变;在压力 F_3 作用下,下层箱体侧板产生压缩形变,同时上层箱体底板在反作用力下产生弯曲形变。由于泡沫板材的抗弯曲强度远远低于抗压缩强度,在较小的压力作用下产生较大的弯曲形变,导致断裂。

当泡沫包装箱上下端面增加塑料护板时,塑料护板的抗弯曲强度远远大于泡沫的抗弯曲强度,塑料护板能将压力较均匀地传递到侧板上,交错堆码时箱体压缩的受力情况跟单箱压缩时相似,抗压强度值接近,首先被压溃的地方为护架的 L 型护边。

3.3 复合式泡沫包装箱抗破损性能

3.3.1 箱体盖板、底板的耐破损性能

无护架泡沫包装箱物流过程中,导致箱体盖板、底板破损的原因主要有 3 种:交错堆码时上层箱体的压力作用、运输过程中振动冲击作用、外作用力碰撞。对于交错堆码时的压力作用,通过交错堆码压缩实验以及相关力学分析可知,基于护架保护,复合式泡沫包装箱盖板、底板的耐破损性大大增强。

运输过程中的振动冲击力作用是导致箱体底板破损的重要原因,车辆的振动作用下,箱内物体对箱体底板产生较大的冲击力,当箱体下面出现隔空时,由于泡沫板的抗弯曲强度很低,很容易破裂。箱体面跌落实验模拟出上下振动冲击的环境条件,测定包装箱底板抗冲击性能。表 3 是无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的面跌落测试实验数据。从实验情况得出,无护架泡沫包装箱跌落高度 400 mm 时,4 个实验样品会出现轻微破损,跌落高度达到 800 mm 时,5 个实验样品全部破损,而复合式泡沫包装箱进行 800 mm 高度的跌落测试时,5 个实验样品 4 个完好,只有 1 个出现轻微破损。由此可见,复合式泡沫包装箱由于上下塑料护板的保护,耐破损性能远远优于无护架的泡沫包装箱。这在搬运冷冻物品泡沫包装箱时得到验证,内装物体质量较大时,普通泡沫包装箱很容易出现穿底破损,采用复合式泡沫包装箱则可以避免该问题。

3.3.2 棱边抗断裂性能

由于泡沫包装箱结构强度低,运输过程中箱体水平方向的晃动很容易导致箱体棱边断裂,特别是箱体底部的棱边。复合式泡沫包装箱的棱边具有 L 型护边保护,可减少棱边断裂问题。通过箱体的棱跌落实验,可以测试出无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的棱边抗断裂性能。表 4 是无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的棱跌落实验测试情况。

从棱跌落实验可得出,跌落高度为 600 mm 时,5 个无护架泡沫包装箱实验样品全部出现棱边断裂,而复合式泡沫包装箱只有 1 个出现轻微断裂,其他 4 个实验样品完好。复合式泡沫包装箱棱边的抗断裂性能增强的主要原因是:L 型护边的抗弯曲强度大于泡沫材料,减少泡沫包装箱棱边的弯曲断裂。

3.3.3 抗撞击破损性能

泡沫材料的戳穿强度很低,受到撞击时容易破损。复合式泡沫包装箱的上下护板可对泡沫箱的盖板、底板进行撞击保护,L 型护边可减少箱体边角受碰撞、挤压时的损伤。表 5 是无护架泡沫包装箱和复合式泡沫包装箱的角跌落测试情况。从表中可以看出,复合式泡沫包装箱边角抗撞击性能得到大幅度提升,跌落高度为 600 mm 时,5 个无护架泡沫包装箱实验样品全部出现角破损,而复合式泡沫包装箱只有 1 个出现轻微的角破损,其他 4 个实验样品完好。安全跌落高度提高到 600 mm 左右。

表 3 箱体样品面跌落测试实验数据
Table 3 Result of surface contact drop test

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
无护架泡沫包装箱	跌落高度 400 mm	△	√	△	△	△
	跌落高度 600 mm	×	×	△	×	△
	跌落高度 800 mm	×	×	×	×	×
复合式泡沫包装箱	跌落高度 400 mm	√	√	√	√	√
	跌落高度 600 mm	√	√	√	√	√
	跌落高度 800 mm	√	△	√	√	√
	跌落高度 1000 mm	△	√	√	√	△
	跌落高度 1200 mm	×	△	△	√	△
	跌落高度 1400 mm	△	△	×	△	△
	跌落高度 1600 mm	×	△	×	×	△

注: √箱体完好; △轻微破损; ×破损。

表 4 箱体样品棱跌落测试实验数据
Table 4 Result of edge contact drop test

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
无护架泡沫包装箱	跌落高度 400 mm	×	△	△	×	×
	跌落高度 600 mm	×	×	×	×	×
	跌落高度 400 mm	√	√	√	√	√
复合式泡沫包装箱	跌落高度 600 mm	△	√	√	√	√
	跌落高度 800 mm	△	√	√	√	△
	跌落高度 1000 mm	×	√	△	√	△
	跌落高度 1200 mm	△	×	△	△	△
	跌落高度 1400 mm	△	△	×	×	×

注: √箱体完好; △轻微断裂; ×断裂。

表 5 箱体样品角跌落测试实验数据
Table 5 Result of corner contact drop test

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
无护架泡沫包装箱	跌落高度 400 mm	×	×	×	△	×
	跌落高度 600 mm	×	×	×	×	×
	跌落高度 400 mm	√	√	√	√	√
复合式泡沫包装箱	跌落高度 600 mm	√	√	√	△	√
	跌落高度 800 mm	△	△	√	△	×
	跌落高度 1000 mm	×	△	×	√	△
	跌落高度 1200 mm	×	×	△	×	×

注: √箱体完好; △轻微破损; ×破损。

目前, L 型护边已经广泛应用于包装领域, 特别是易破损商品的包装, 如瓷砖的包装。复合式泡沫包装箱上的护边可以保护箱体的边和角, 减少仓储、运输、装卸过程中的碰撞损伤。而且, 采用打包机打包时, 不会压塌箱体的棱边, 进一步提升箱体的强度。

4 结论与讨论

对于重叠堆码, 复合式泡沫包装箱抗压强度平均值由普通泡沫包装箱的 1557.22 N 提升到 1959.29 N, 对于交

错堆码, 抗压强度由 1039.18 N 提升到复合式泡沫包装箱的 1978.56 N。对于尺寸为 410 mm×270 mm×190 mm 的泡沫包装箱, 装满冻肉时, 质量达到 6 kg, 假定 11 层堆码运输, 运输过程中产生的上下冲击加速度峰值为 2 倍重力加速度, 预算出底层箱体最大冲击压力为 1176 N^[14-16]。重叠堆码状态、货物满箱支撑箱体状态、压力均匀分布状态下, 普通泡沫包装箱不会压溃, 但实际运输过程, 由于车辆的振动作用, 会出现重叠堆码错开, 箱内物体体积变小, 压力不均匀等问题, 交错堆码的抗压强度 1039.18 N 小于底

层箱体最大冲击压力 1176 N, 箱体压溃, 物品受损, 而复合式泡沫包装箱的抗压强度达到 1978.56 N, 可避免箱体压溃问题。

对于内装 3 kg 物品的泡沫包装箱跌落实验, 采用护架后, 面跌落破损高度由 800 mm 提高到 1400 mm, 箱体抗垂直冲击能力提升; 棱跌落破损高度由 600 mm 提高到 1200 mm, 角跌落破损高度由 400 mm 提高到 1000 mm, 运输过程中, 箱体抗水平冲击能力提升, 箱体的棱边和角能得到有效保护。

因此, 本研究设计的复合式泡沫包装箱不破坏泡沫包装箱原有的包装性能, 提高了箱体的结构强度, 适合多层堆码, 满足冻品运输要求, 可用于实际生产中。另外, 本研究还为冻品的大箱体包装运输提供了理论依据。泡沫板材厚度达到 20 mm 时, 基本上已经满足隔热的需要^[5], 对于大尺寸泡沫箱体, 为了提高箱体强度增加板材厚度, 则成本增加, 容载效率降低, 复合式泡沫包装箱可以不增加箱体泡沫板厚度的同时解决大箱体的结构强度问题, 实现冻品的大箱体包装运输。

当然, 复合式泡沫包装箱也存在一些不足, (1)增加了箱体自重, 本实验泡沫包装箱平均重量 264 g, 护架平均重量 595 g, 用于 6 kg 的冻品包装时, 增重 9.5%, 相对偏高; (2)包装作业较为复杂, 增加了护架的安装、拆卸过程, 耗时耗工。但复合式泡沫包装箱可用打包机打包捆扎, 这有利于大箱体、重箱体的封箱, 可提高箱体强度, 便于装卸、搬运。同时, 护板可以预印图文信息, 解决泡沫包装箱的装潢印刷问题。

本研究是复合式泡沫包装箱设计应用的初步研究, 对于护架板材的厚度、宽度与包装箱大小的关系没有展开, 还值得深入研究。

参考文献

- [1] 肖迪. 冷冻运输的快递包装设计及其运输模式[J]. 现代工业经济和信息化, 2019, (2): 40-42.
Xiao D. Design of express packaging for frozen transportation [J]. Mod Ind Econ Inf, 2019, (2): 40-42.
- [2] 范珺. 冷冻食品包装材料问题分析及解决方案[J]. 塑料包装, 2014, 24(1): 29-31.
Fan J. Frozen food packaging problems & solution [J]. Plast Packag, 2014, 24(1): 29-31.
- [3] 张鑫鑫, 陆新宇, 陈建忠, 等. 冷链可折叠保温箱设计及试验研究[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(4): 32-35.
Zhang XX, Lu XY, Chen JZ, et al. Design and experimental study of cold chain foldable insulation box [J]. Packag Food Mach, 2016, 34(4): 32-35.
- [4] 朱怡馨, 陈晨伟, 罗敏成, 等. 可折叠水产品运输保温包装箱结构设计[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 30-34.
Zhu YX, Chen CW, Luo MC, et al. Structure design of foldable insulation packaging container for aquatic products [J]. Packag Eng, 2015, 36(15): 30-34.
- [5] 张婉莹. 瓦楞纸箱及 EPS 泡沫箱包装组合的保温时间研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
Zhang WY. Study on the holding time of corrugated box and EPS foam box packaging combination [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [6] 葛露. 质量主体-EPS 泡沫-瓦楞纸板缓冲系统的有限元设计[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 139-142.
Ge L. Finite element design of cushioning system for mass-EPS foam-corrugated board [J]. Packag Eng, 2017, 38(17): 139-142.
- [7] 杨凌云, 郭勇, 吴淑芳. EPS 泡沫与 C 楞瓦楞纸板串联系统的缓冲分析与应用[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 10-12, 64.
Yang LY, Guo Y, Wu SF. Cushioning analysis and application of EPS and C-flute corrugated paperboard series packaging system [J]. Packag Eng, 2013, 34(7): 10-12, 64.
- [8] 何理, 丁毅, 贾丽萍. 不同湿度条件下瓦楞纸箱抗压强度的实验研究[J]. 包装工程, 2012, (17): 68-69.
He L, Ding Y, Jia LP. Study of corrugated box compression strength under different humidity [J]. Packag Eng, 2012, (17): 68-69.
- [9] 秦志远, 黄海松, 张慧. EPS 泡沫包装箱有限元分析与优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 100-104.
Qin ZY, Huang HS, Zhang H. Finite element analysis and optimal design of EPS foam packing case [J]. Packag Eng, 2016, 37(23): 100-104.
- [10] 郭晓娟, 钱静. 基于 ANSYS 保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43-48.
Guo XJ, Qian J. Spherical shell models for insulating packages based on ANSYS [J]. Packag Eng, 2011, 32(5): 43-48.
- [11] 熊志远. 聚苯乙烯泡沫(EPS)力学行为的实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2007.
Xiong ZY. Experimental study on mechanical behaviors of expanded polystyrene(EPS) [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2007.
- [12] 江春冬, 武玉维, 杜太行, 等. 包装件在随机振动下的破损机理及相关量检测[J]. 中国测试, 2015, 41(8): 27-30.
Jiang CD, Wu YW, Du TH, et al. Damage mechanism of the package under random vibration and the detection of relevant quantities [J]. Chin Measur Test Technol, 2015, 41(8): 27-30.
- [13] GB 4857.4-2008 包装 运输包装件基本试验 第 4 部分 采用压力试验机进行的抗压和堆码试验方法[S].
GB 4857.4-2008 Packaging-Basic tests for transport packages-Part 4: compression and stacking test methods using pressure testing machines [S].
- [14] 王志伟, 戚德彬. 两层计算机堆码包装动力学试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 90-99.
Wang ZW, Qi DB. Experimental study of dynamic response of two layers stacked packaging units of computers [J]. J Mach Eng, 2017, 53(3): 90-99.
- [15] 房树盖, 王志伟. 不同加速度谱型激励下非线性堆码包装系统的动力学响应[J]. 应用力学学报, 2019, 36(6): 1286-1293.
Fang SG, Wang ZW. Dynamic responses of nonlinear stacked packaging system under different spectral acceleration excitations [J]. Chin J Appl Mech, 2019, 36(6): 1286-1293.
- [16] 王志伟, 林深伟. 随机振动下产品包装件动态响应的实验研究和有限

- 元分析[J]. 振动与冲击, 2017, 13: 223-229.
- Wang ZW, Lin SW. Experimental investigation and finite element analysis of dynamic response of packaged product in random vibration [J]. J Vibrat Shock, 2017, 13: 223-229.
- [17] 章佳平, 章军, 崔军, 等. 塑料瓦楞板组合式周转箱设计及跌落分析[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 96-101.
- Zhang JP, Zhang J, Cui J, *et al.* Design and drop analysis of spliced plastic corrugated turnover box [J]. Packag Eng, 2018, 39(11): 96-101.
- [18] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 44-48.
- Ding YP, Qian Y. Drop simulation analysis and structure optimization of the overall package [J]. Packag Food Mach, 2014, 32(4): 44-48.
- [19] 陈志华, 聂羽飞. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的运输容器跌落分析[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(6): 35-38.
- Chen ZH, Nie YF. Dropping analysis of shipping container based on ANSYS /LS-DYNA [J]. Packag Food Mach, 2016, 34(6): 35-38.
- [20] GB/T 4857.5-92 包装 运输包装件 跌落试验方法[S].
- GB/T 4857.5-92 Packaging Transport packages Vertical impact test method by dropping [S].

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



夏自由, 硕士, 主要研究方向为包装结构设计、包装测试。
E-mail: 31922916@qq.com