

基于折纸技术的包装结构变容积设计应用与分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.0009

张妍悦 肖颖喆
黎千禧 梁清也

湖南工业大学
包装工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 针对现有包装空间利用率低、材料浪费、缺乏新意等问题, 根据可折叠包装调研结果, 采用三浦折叠、对角折叠和吉村式折叠 3 种折纸技术, 构建相应的折痕数学模型, 并优化折痕结构参数, 进行包装结构变容积设计。实验结果表明, 3 种折叠包装结构均具有良好的折展比, 支撑强度与抗张强度测试均满足使用需求, 可以有效保护内装物, 便于运输和存储。其中, 对角折叠包装的综合效果最好, 具有实用性和一定的市场前景, 为可折叠变容积的包装结构设计提供了新思路。

关键词: 折纸技术; 纸包装; 折叠结构; 折痕设计; 容积可变

中图分类号: TB482.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)03-0097-06

引文格式: 张妍悦, 肖颖喆, 黎千禧, 等. 基于折纸技术的包装结构变容积设计应用与分析 [J]. 包装学报, 2025, 17(3): 97-102.

折纸技术是一种通过对平面材料 (如纸张、金属薄片、塑料薄片、复合材料等) 进行折叠, 从而实现二维平面到三维形态转换的技术^[1]。其广泛应用于建筑、航天航空及机器人等领域, 帮助工程师优化设计, 使产品在折叠状态下占用更小的空间, 在展开状态下实现预期的功能或形态^[2-5]。近年来, 应用片状材料进行特定结构的平面折叠, 是实现变容积包装设计的主要途径。改进原有折痕设计, 可实现适用多种材料的完全刚性折平^[6], 方便批量生产及自动化包装。

在包装结构设计中应用折纸技术具有几个明显的优势: 1) 通过合理的折痕设计, 使包装在未使用时折叠成扁平状态, 实现节省存储和运输空间的目的^[7], 进而节约运输与仓储成本。2) 采用折纸技术设计的包装通常使用单一材料, 无需胶水或其他黏合剂, 有助于提高其可回收性和环保性能^[8]。3) 折纸技术可以赋予包装独特的艺术美感, 能提升产品的附加值, 进而提高产品的品牌形象和市场竞争力^[9]。

综上, 本研究以可折叠纸板材料为例, 先分析常

见折纸技术三浦折叠、对角折叠和吉村式折叠的折痕设计, 并建立相应的数学模型^[10], 再通过优化折痕结构参数, 提高变容积包装结构的支撑强度和抗张强度。

1 基于折纸技术的包装结构变容积设计方法

典型的折痕图有三浦 (Miura-ori) 折叠、对角 (Kresling) 折叠、Ros-Resch 折叠、水弹 (Waterbomb) 折叠和吉村 (Yoshimura) 式折叠^[11]。下文详细介绍三浦折叠、对角折叠和吉村式折叠的折痕计算过程。

1.1 三浦折叠

三浦折叠由日本三浦公亮教授发明^[12], 如图 1 所示。图中, 虚线代表谷折, 实线代表山折, 边缘为切割线。该折叠方式是通过拉开对角两端展开, 而反向推入则收缩。通过单一的拉伸动作快速展开包装, 方便用户取用产品, 且展开后结构具有较高的稳定性, 可以很好地保护产品。三浦折叠既节省空间, 又

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2023YFC3904603)

作者简介: 张妍悦, 女, 硕士生, 主要研究方向为智能包装材料与结构, E-mail: 1837746752@qq.com

可避免折叠和展开过程中造成损耗^[13]。

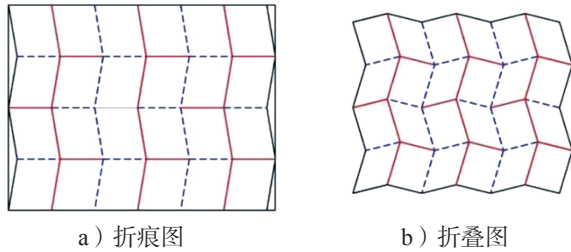


图 1 三浦折叠结构

Fig. 1 Miura-ori structure

1.1.1 折痕设计公式推导

三浦折叠的折痕设计如图 2 所示。图中，单胞折痕长度为 a ，单胞折痕高度为 b ， a 和 b 的夹角为锐角 γ ，折叠平面与 xOy 平面所形成的二面角为 θ 。为了推导出的公式更加简洁，单胞空间高度为 $2S$ ，单胞空间长度为 $2L$ 。推导公式如下：

$$S = b \times \frac{\cos \theta \tan \gamma}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \gamma}}, \quad (1)$$

$$L = a \times \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \gamma}, \quad (2)$$

$$V = b \times \frac{1}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \gamma}}, \quad (3)$$

$$\tan \beta = \cos \theta \tan \gamma, \quad (4)$$

$$\sin \alpha = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}. \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中： V 为单胞折叠变化长度； β 为单胞折痕高度与 y 轴的夹角； α 为单胞折叠平面与 zOy 平面的夹角。

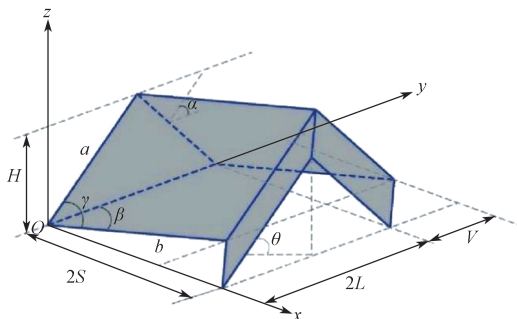


图 2 三浦折叠折痕模型

Fig. 2 Miura-ori crease model

1.1.2 三浦折叠结构设计应用

由于三浦折叠的展开方式为横向展开，无法满足桶状包装结构的设计需求，故在原有的基础上增加折痕线，使得改进后的三浦折叠结构适用于桶装产品的包装。改进后的三浦折叠桶状变容积包装结构如图 3 所示。



图 3 改进后的三浦折叠桶状变容积包装结构

Fig. 3 Improved Miura-ori bucket shaped variable volume packaging structure design

以现有桶装方便面包装尺寸为参照，设桶体直径为 156 mm，周长为 490 mm，整体高度为 135 mm。预设置 20 个折叠单胞，折叠区域总高度设置为 30 mm，得到 $b = 490/20 = 24.5(\text{mm})$ ，定义 $\gamma = 22^\circ$ ，得到 $a = 26.46 \text{ mm}$ ， θ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间，取 $\theta = 30^\circ$ 。将以上数值代入式 (1) ~ (5) 中，计算得到： $S = 8.09 \text{ mm}$ ， $L = 25.99 \text{ mm}$ ， $\beta = 19.28^\circ$ ， $\alpha = 61.81^\circ$ 。

三浦折叠桶状变容积包装的结构展开如图 4 所示。图中，横线、纵线均平行，山折线有 60 条，谷折线有 60 条。

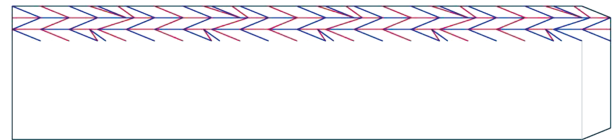


图 4 三浦折叠桶状变容积包装结构展开图

Fig. 4 Miura-ori folding bucket variable volume packaging structure development

1.2 对角折叠

对角折叠通常是通过矩形的对角线来形成基础的折痕线^[14]，这种设计具有对称性和方向性，如图 3 所示。图中，虚线代表谷折，实线代表山折，边缘为切割线。对角折叠设计直观，折叠路径短，能够快速压缩和展开，占用体积较小，适合工业生产中快速成型的需求。包装容器结构设计中，对角线的折叠方向与容器垂直方向的主要折叠线折叠方向相反，通过扭转压缩实现结构的容积变形。

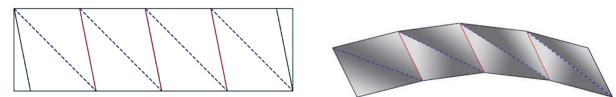


图 5 对角折叠结构

Fig. 5 Diagonally folded structure

1.2.1 折痕设计公式推导

对角折叠折痕模型如图 6 所示。对角折叠形成的结构为圆柱体，单胞边长为 S_1 ，单胞高度为 L_1 且垂直于单胞边长，谷折线长度为 a_1 ，山折线长度为

b_1 , 折痕数量为 n 。

推导公式如下:

$$S_1 = \frac{2\pi r}{n}, \quad (6)$$

$$b_1 = \sqrt{L_1^2 + 4S_1^2}, \quad (7)$$

$$\sin \beta = \frac{L_1}{b_1}, \quad (8)$$

$$a_1 = \sqrt{L_1^2 + S_1^2}, \quad (9)$$

$$\sin \gamma = \frac{L_1}{a_1}, \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \gamma_1 - \beta_1. \quad (11)$$

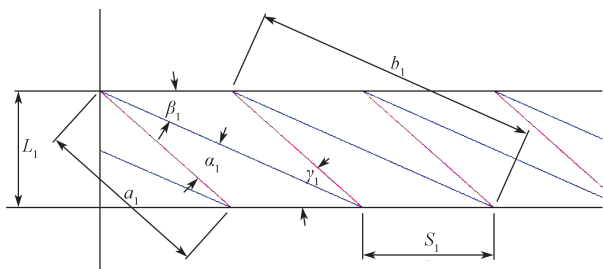


图6 对角折叠折痕模型

Fig. 6 Diagonal folding crease model

式中(6)~(11): α_1 为山折线与谷折线的夹角; γ_1 为谷折线与单胞边夹角; β_1 为山折线与单胞边缘夹角; r 为圆柱体半径。

1.2.2 对角折叠结构设计应用

以桶装方便面为设计对象, 基本包装形貌如图7所示。



图7 对角折叠桶状变容积包装设计

Fig. 7 Diagonal folding bucket shaped variable volume packaging structure design

设桶的直径为156 mm, 则 r 为78 mm, 整体高度为135 mm。预设折叠区域分为14个折叠模块即 $n=14$, 折叠区域总高度 H_1 为24 mm。将上述数值代入式(6)~(11)中, 计算得到: $S_1=34.9$ mm, $b_1=73.81$ mm, $a_1=42.35$ mm, $\beta_1=18^\circ$, $\gamma_1=34.5^\circ$, $\alpha_1=16.5^\circ$ 。

对角折叠桶状变容积包装展开如图8所示。山折线共16条, 谷折线共15条。谷折线互相平行, 山折线也互相平行, 且谷折线与山折线首尾交替相连。

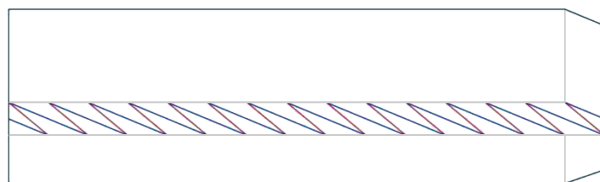


图8 对角折叠桶状变容积包装展开图

Fig. 8 Diagonally folded barrel variable-volume package development

1.3 吉村式折叠

吉村式折叠通过轴向压缩实现模型收缩, 如图9所示。折痕由交替的山折和谷折组成。图中, 虚线代表谷折, 实线代表山折, 边缘为切割线。折叠单元为等腰梯形, 其长短轴比会直接影响折叠的形变特性。

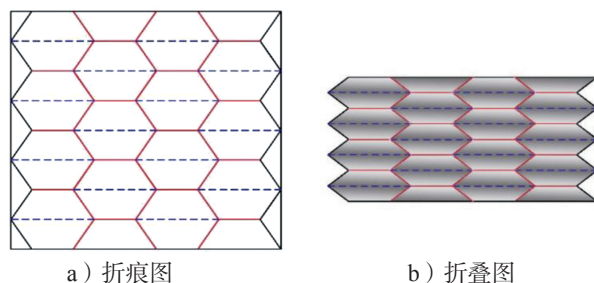


图9 吉村式折叠结构

Fig. 9 Yoshimura folding structure

1.3.1 折痕设计公式推导

改进后的吉村式折叠结构如图10所示。已知等边梯形的两条平行边长分别为 c_1 和 c_2 , 高为 H , 底角为 γ' , θ' 为相邻谷折折痕连接两平面的二面角, φ 为顶点处相交的两条斜线折痕之间的夹角, 圆柱体高为 H' , 直径为 R 。原始吉村式折叠成型后会产生很多的突起, 不适用于桶装包装, 因此对折痕进行改进, 将 c_2 长度缩小为0, 即得到新的折痕设计。缩小 c_2 后, 产生的突起变为原始吉村式折叠数量的一半。

改进后的吉村式折叠折痕模型如图11所示。定义吉村式折叠单胞高度为 H_2 , b_2 为单胞高度的一半, a_2 为单胞谷折线的二分之一, 单胞长度为 L_2 , 谷折线与山折线的夹角为 γ_2 。推导公式如下:

$$h_2 = b_2 \tan \theta, \quad (12)$$

$$\sin \gamma_2 = \frac{a_2}{L_2} = \frac{b_2}{a_2}, \quad (13)$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{L_2}{2a_2}. \quad (14)$$

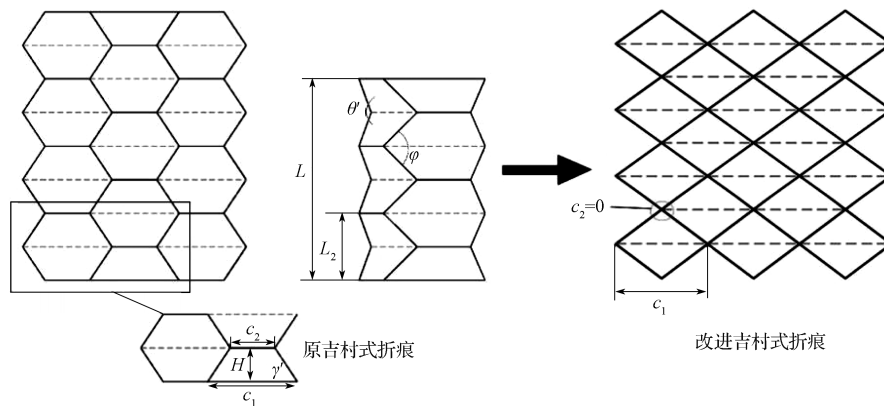


图 10 改进后的吉村式折叠示意图

Fig. 10 Improved Yoshimura crease diagram

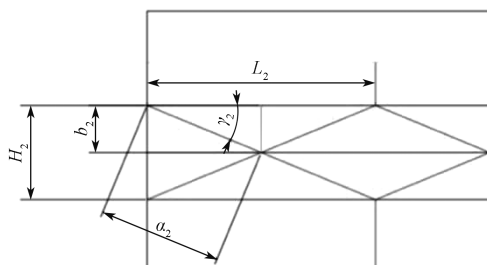


图 11 改进后的吉村式折痕模型

Fig. 11 Improved Yoshimura crease improvement model

1.3.2 改进后的吉村式折叠结构设计应用

桶装方便面的包装结构由圆桶状改为八棱柱，基本包装形貌如图 12 所示。



图 12 改进后的吉村式折叠桶状变容积包装

Fig. 12 Improved Yoshimura folding bucket variable volume packaging

设桶身周长为 424 mm，整体高度为 130 mm，设置 8 个吉村式折叠模块，则有 $L_2=424/8=53(\text{mm})$ 。折叠区域高度为 22 mm，平面夹角 θ_1 为 30° 。则 $a_2=28.68 \text{ mm}$ ， $h_2=10.98 \text{ mm}$ 。将上述数值代入式 (12) ~ (14) 中，计算得到： $H_2=6.34 \text{ mm}$ ， $\gamma_2=22.51^\circ$ ， $L_2=52.8 \text{ mm}$ 。

改进吉村式折叠桶状变容积包装展开如图 13 所示。山折线共 34 条，谷折线共 3 条。折痕区域为 3 条长谷折线平行排列。山折线交叉且首尾相连，具有

极强的规律性。

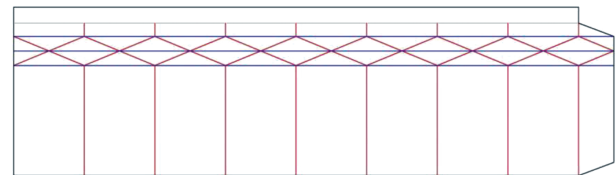


图 13 改进后的吉村式折叠桶状变容积包装展开图

Fig. 13 Improved Yoshimura folding bucket variable volume packaging development diagram

2 可折叠变容积包装结构性能测试

应用折纸技术对包装容器进行变容积结构设计，需要对其在运输、储存和使用过程中对产品的保护功能、容装功能及可折叠功能进行评估。通过分析包装折展比、抗压性和耐撕裂性，发现设计中的弱点和改进空间，从而优化包装结构，提高包装的功能性和应用效率。

2.1 包装折展比

包装折展比是衡量可折叠结构压缩和展开能力的关键参数，通常用于评价折叠结构在包装设计中的体积变化效率，即包装在折叠与展开状态下的空间占比。折展比越大，说明物体在展开后的空间利用效率越高。计算包装折展比有助于优化包装设计，提高存储和运输过程中的空间利用率，降低物流成本，还能够指导包装材料的合理使用，在保证展开功能的前提下最大限度减少材料浪费，从而提高包装的经济性和环保性。通过量化折展比，可以更科学地评估和比较不同的包装方案，支持基于数据的决策。

折展比为折叠结构展开后的体积 ($V_{\text{展}}$) 与折叠状态下的体积 ($V_{\text{折}}$) 的比值，即

$$\eta = \frac{V_{\text{展}}}{V_{\text{折}}}。 \quad (15)$$

3 种折叠包装方案的折展比如表 1 所示。由表 1 可知,改进后的三浦折叠和对角折叠在体积相同的条件下,改进后的三浦折叠的折展比更高,而改进后的吉村式折叠因包装主体为八棱柱,故总体积较小,折展比比前两者也低。

表 1 3 种折叠包装折展比

Table 1 Three kinds of folding package folding ratio

折叠结构	展开体积 /cm ³	折叠体积 /cm ³	折展比
改进后的三浦折叠	2580.31	2006.91	1.29
对角折叠	2580.31	2121.59	1.22
改进后的吉村式折叠	1762.28	1464.05	1.20

2.2 包装抗压性

支撑强度测试是评估包装容器在实际使用中承受外力能力的测试。它能够验证包装结构设计是否满足力学性能要求,同时测试包装薄弱点,为优化折叠容器的安全性和稳定性提供数据支持。3 种折叠包装方案的支撑强度测试结果如表 2 所示。

表 2 3 种折叠包装的支撑强度测试

Table 2 Support strength test for three types of folded packaging

折叠结构	负荷 /N	折叠区域高度变化值 /mm
改进后的三浦折叠	2.598	0
	5.598	2
	7.598	3
	8.598	6
	9.598	8
改进后的三浦折叠	10.598	11
	250.098	0
	550.098	0
	750.098	0
	850.098	0
改进后的吉村式折叠	950.098	1
	1050.098	2
	250.098	1
	550.098	1
	750.098	1
改进后的吉村式折叠	850.098	1
	950.098	2
	1050.098	3

由表 2 可知,3 种包装结构的形变量都随着压力的增加而增加,对角折叠结构的变形量最小,改进后

的吉村式折叠结构次之,改进后的三浦折叠结构的变形量最大。分析原因主要包括两方面:1)不同折痕经折叠后抗压性不同;2)折叠区域在包装中所处的位置不同,折叠区域在包装中部的抗压性更高。

2.3 包装耐撕裂性

抗张强度是衡量材料抵抗拉伸力的重要指标,能评估材料在应力下的承载能力,帮助识别潜在的安全隐患和风险,从而预防包装在使用过程中出现断裂或损坏。3 种折叠结构的单胞抗张强度测试结果如表 3 所示。

表 3 3 种折叠结构的单胞抗张强度测试

Table 3 Single cell tensile strength test of three folded structures

折叠结构	样品编号	抗张强度 /MPa
单胞三浦折叠	1-1	8.332
	1-2	8.624
	1-3	8.731
单胞对角折叠	2-1	10.237
	2-2	10.376
	2-3	10.728
单胞吉村式折叠	3-1	5.544
	3-2	3.631
	3-3	3.668

由表 3 可知,改进后的三浦折叠单胞试样的平均抗张强度约为 8.562 MPa,对角折叠单胞试样的平均抗张强度约为 10.447 MPa,改进后的吉村式折叠单胞试样的平均抗张强度为 4.281 MPa。对角折叠的抗张强度最高,改进后的三浦折叠次之,改进后的吉村式折叠最低。

3 结语

本研究以桶装方便面产品为设计对象,将三浦折叠、对角折叠、吉村式折叠 3 种不同的结构应用于包装中,并对折痕进行二次设计,优化包装。由 3 种包装样品的实验结果可知,改进后的三浦折叠结构的折展比最高即空间利用率高,支撑强度最高;对角折叠结构的抗张强度最高。从工业化生产的角度来讲,三浦折叠结构的折痕数量最多,吉村式折叠结构次之,对角折叠结构最少。综合实验结果和成型难度两方面考虑,对角折叠包装效果最好。

折纸技术中的折展变化在工程、建筑、航空航天、生物医药等多个领域均有广泛应用,在包装领域的应

用涉足较少。随着科技的进步,智能材料和可编程折纸技术将为包装赋予更多多样化的功能与应用,可以实现包装造型与结构的个性化和定制化设计,满足不同客户的需求,使包装不仅具备保护与展示的基本作用,还能实现自适应、可重复使用以及智能交互等创新应用,从而提高包装的灵活性和创新性。

参考文献:

- [1] 李 笑, 李 明. 折纸及其折痕设计研究综述 [J]. 力学学报, 2018, 50(3): 467-476.
- [2] NICHOLAS T, BILL G, MIHIR S. Review of Origami Applications in Mechanical Engineering[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(14): 2345-2362.
- [3] 王 贞. 折折叠叠—纸包装结构减量化设计方法研究 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2018.
- [4] 张 婧. 基于极简主义理念的绿色包装设计 [J]. 上海包装, 2023(9): 13-15.
- [5] 申婷婷, 付 昕. 浅谈蜂窝纸板的结构、性能及在包装领域的应用 [J]. 河南科技, 2013, 32(19): 73.
- [6] WU W N, YOU Z. A Solution for Folding Rigid Tall Shopping Bags[C]//Proceedings of the Royal Society of A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. London: Royal Society, 2011, 467(2133): 2561-2574.
- [7] 浦海涛. 基于可持续发展理念的绿色包装设计 [J]. 上海包装, 2023(12): 24-26.
- [8] 李 昭, 孙建明, 王小芳, 等. 基于减量化理念的绿色包装设计研究 [J]. 包装学报, 2018, 10(4): 50-55.
- [9] 王北海, 张国全, 路婉秋. 个性定位, 特色发展: 包装工程专业师生协同发展探索 [J]. 包装工程, 2022, 43(S2): 63-67.
- [10] 肖颖喆, 罗景明. 基于结构与功能可变的纸包装容器可持续设计方法解析 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 16-21, 74.
- [11] LANG R J. Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art[J]. Mathematical Intelligencer, 2005, 27(2): 92-95.
- [12] FRANCIS K C, BLANCH J E, MAGLEBY S P, et al. Origami-Like Creases in Sheet Materials for Compliant Mechanism Design[J]. Mechanical Sciences, 2013, 4(2): 371-380.
- [13] OVERVELDE J T B, DE JONG T A, SHEVCHENKO Y, et al. A Three-Dimensional Actuated Origami-Inspired Transformable Metamaterial with Multiple Degrees of Freedom[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10929.
- [14] 陈 焱, 顾元庆. 折纸运动学综述 [J]. 力学进展, 2023, 53(1): 154-197.

(责任编辑: 邓 彬)

Application and Analysis of Packaging Structure Variable Volume Design Based on Origami Technology

ZHANG Yanyue, XIAO Yingzhe, LI Qianxi, LIANG Qingye

(School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low utilization rate of existing packaging space, waste of materials and lack of novelty, according to the research results of foldable packaging, Miura folding, diagonal folding and Yoshimura folding were adopted to construct the corresponding mathematical model of folding, and optimize the parameters of folding structure to carry out the variable volume design of packaging structure. The experimental results show that all of the three folding packaging structures have good folding ratio, while the support strength and tensile strength test can meet the application requirement by effectively protecting the contents and being easy to transport and storage. Among them, the comprehensive effect of diagonal folding packaging is the best. With its practicability and market prospects, it can provide a new idea for the collapsible variable volume packaging structure design.

Keywords: origami technology; paper packaging; folding structure; crease design; space folding