

螺旋扣合式PE膜悬浮收纳盒设计与研究

李嘉伟

广州科技职业技术大学智能工程与未来学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年6月2日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年9月15日

摘 要

针对现有悬浮收纳盒制造价格昂贵、难以回收利用的问题, 设计一种新型悬浮收纳盒。该设计采用上下环形框与内环形框螺旋旋合结构, 配合圆柱形可脱卡扣与弹簧卡扣实现盒体锁紧, 选用高透明食品级PE膜为悬浮承载材料, 本文采用PETG材料3D打印增材制造盒体, 通过螺旋周向压力实现膜体均匀张紧和方便拆卸, 完成结构设计与性能测试。该收纳盒可徒手快速拆装, PE膜张紧均匀无褶皱, 密封防尘防潮性能良好, 膜体可单独更换, 承载精细小件时悬浮稳定。该结构简洁可靠、操作效率高、可循环使用, 能够满足回收再利用、方便拆卸、快速更换膜体等要求。

关键词

悬浮收纳盒, 螺旋扣合, 3D打印增材制造

Design and Research of Spiral Fastening PE Film Suspension Organizer Box

Jiawei Li

School of Intelligent Engineering and the Future, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: June 2, 2026; accepted: July 17, 2026; published: September 15, 2026

Abstract

Aiming at the existing levitation storage box manufacturing expensive, difficult to recycle the problem, design a new type of levitation storage box. The design adopts the upper and lower annular frame and the inner annular frame spiral screw structure, with cylindrical removable buckle and

spring buckle to realize the box body locking, selecting high transparent food-grade PE membrane as the levitation bearing material, this paper adopts the PETG material 3D printing additive manufacturing box, through the spiral circumferential pressure to realize the membrane body uniform tension and convenient disassembly, to complete the structural design and performance testing. The organizer can be quickly disassembled with bare hands, the PE membrane is uniformly tensioned without wrinkles, has good sealing, dustproof and moisture-proof performance, the membrane can be replaced individually, and the levitation is stable when carrying fine and small parts. The structure is simple, reliable, efficient and recyclable, which can meet the requirements of recycling, easy disassembly and quick replacement of membrane.

Keywords

Suspension Organizer, Spiral Buckling, 3D Printing Additive Manufacturing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着消费升级与个性化收纳需求的增长, PE 膜悬浮收纳盒因具备可视化展示、防刮擦保护以及一定程度的防潮防尘能力, 在饰品收藏、潮流玩具、精密电子元件等细分市场中获得了日益广泛的使用。目前市售的多数同类产品构造单一, 一旦薄膜损坏便无法替换, 既增加了开支, 也不符合绿色环保理念。塑料零部件之间的连接方式中, 卡扣结构因其简便高效而被广泛采用。本产品创造性地融合了螺旋扣合机构与双重卡扣锁定机制, 使得薄膜能够被快速替换、受力均匀张紧, 同时保证良好的密封防护效果。设计过程采用 Solidworks 软件完成三维建模, 样品以 PETG 材料为原料通过 3D 打印增材制造方式加工, 随后对拆装操作、薄膜张紧状态以及薄膜可更换性进行了实测评估。

2. 压紧 PE 膜的螺旋拆卸结构设计

巩桂芬及其团队对悬浮包装进行的研究表明, 以 PE 薄膜作为悬浮介质的包装形式具备构造简单、缓冲性能良好、生产成本经济以及可循环利用等一系列优势[1]。然而, 目前有一个市售的首饰收纳盒为采用两内外方形框将 PE 膜压塑成一体的方式, 实现 PE 膜的周向压紧并承载物品, 本文结构设计不仅要实现 PE 膜周向压紧承载物品, 还要能够快速更换 PE 膜, 关键在于将 PE 膜压紧的内外框的结构设计。而内外方形框在压紧时四个角的对角拉紧力容易过大, 使周向拉紧力不均, PE 膜难以展平承载物品如下图 1 所示方形框与环形框对比, 因此采用内外环形框进行对 PE 膜的周向压紧。为了兼顾环形框的形状, 采用螺旋连接结构将内外环形框连接固定, 而在螺旋连接技术领域, 已有专利成果显示螺旋扣结构能够显著增强连接构件的抗拉承载能力[2], 因此本文设计采用螺旋扣合结构。

该结构由两个关键部分组成: 其一是在上下环形框环形槽内壁面上开设的螺旋凹槽道如图 2 所示; 其二是内环形框外侧壁面上设置的四个凸榫如图 3 所示(四个个凸榫其一)。螺旋凹槽道分为斜滑道与平滑道如图 2 注 1 所示, 斜滑道引导凸榫, 为了使内环形框旋入角度最小, 本文选取 20°斜滑道, 其末端衔接一段平滑道, 进一步提升锁紧力, 同时该直道内侧还设有一个锁紧凸台如图 2 注 2 所示, 进一步对凸榫防松设计。

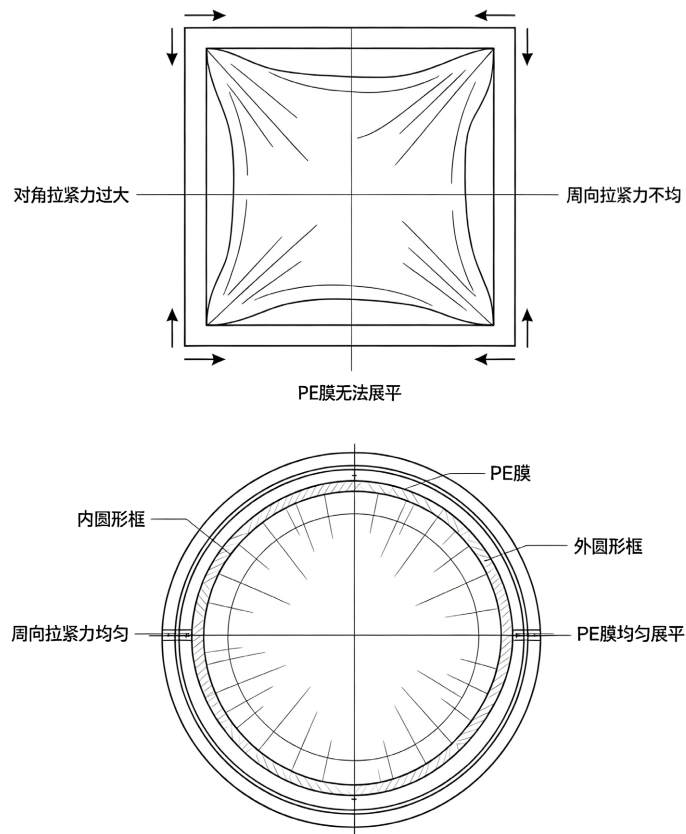
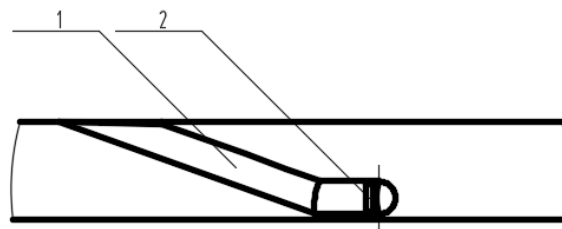


Figure 1. Comparison of square frame and circular frame
图 1. 方形框与环形框对比



注：1：螺旋凹槽斜道与平滑道；2：锁紧凸台。

Figure 2. Spiral notch ramp
图 2. 螺旋凹槽道

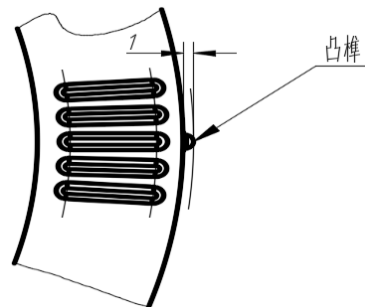


Figure 3. Dovetail
图 3. 凸榫

3. 抠手人机设计要求

基于 GB/T 16252-2023 《成年人手部尺寸分型》国家标准[3]:

男性拇指宽 A_M 与食指远位宽 B_M 回归方程:

$$A_M = 11.604 + 0.123X_{2M}$$

$$B_M = 8.006 + 0.115X_{2M}$$

女性拇指宽 A_F 与食指远位宽 B_F 回归方程:

$$A_F = 8.108 + 0.15X_{2F}$$

$$B_F = 6.792 + 0.123X_{2F}$$

(X_2 为手宽)。

Table 1. Hand size coverage for most adults

表 1. 多数成年人手部尺寸覆盖范围

性别	手宽均值 (mm)	多数工人核心手宽区间 (mm)	区间覆盖率	工业设计推荐手宽 (mm)	覆盖人群说明
成年男工人	约 88	80~100	≥85%	≥85	覆盖绝大多数男性工人
成年女工人	约 80	70~90	≥85%	≥80	覆盖绝大多数女性工人

见上表 1 取各选取手宽均值, 则:

男指宽: $A_M = 11.604 + 0.123 \times 88 = 22.865 \text{ mm}$; $B_M = 8.006 + 0.115 \times 88 = 18.126 \text{ mm}$;

女指宽: $A_F = 8.108 + 0.15 \times 80 = 20.108 \text{ mm}$; $B_F = 6.792 + 0.123 \times 80 = 16.632 \text{ mm}$ 。

参考杨娟等人的《汽车内饰手握件舒适性的截面设计》: 抠手需要满足操作空间、无打滑、无硌手、有厚实感[4]。基于上述计算得最终抠手尺寸: 宽度 5 mm、长度 19 mm、深度 1.8 mm, 如图 4(b)所示; 其抠手作用范围为 6° 的扇环区域, 内环宽 20 mm、外环宽 23 mm, 区域内设有五个同心圆弧阵列分布的抠手如图 4(a)虚线框所示。

若考虑外观、耗材成本等因素, 可将抠手更改为增摩平面如图 5 所示, 尺寸基于人机工程对成年男女拇指宽的标准 A_M 与 A_F 均在 20~23 mm 内, 因此 6° 的扇环区域不做更改, 内环宽 20 mm、外环宽 23 mm; 区域内设有五个同心圆弧阵列分布的椭圆凹面, 宽 3 mm、长 8 mm、深 1.8 mm。

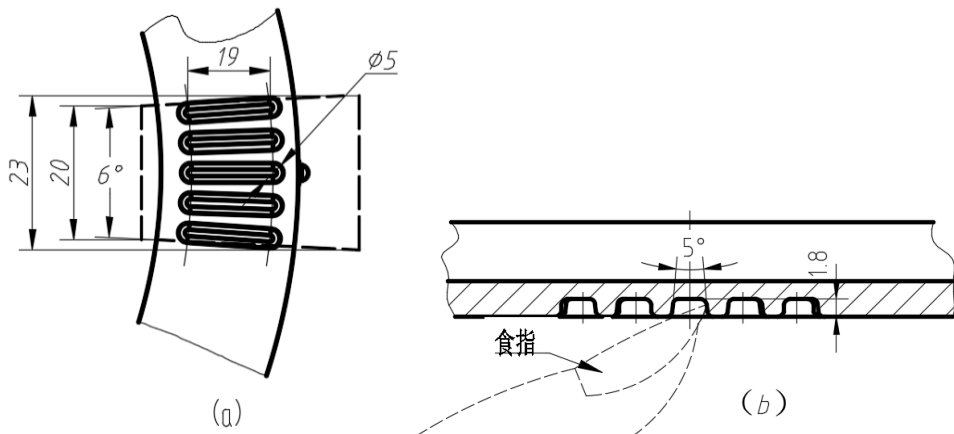


Figure 4. Keyed hand
图 4. 抠手

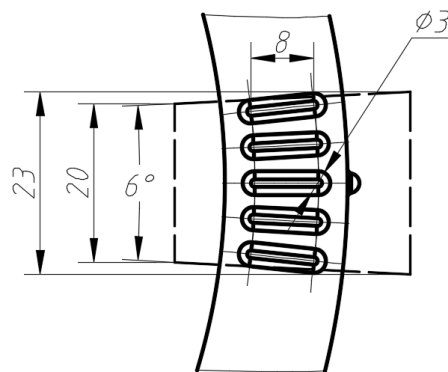


Figure 5. Increasing friction plane
图 5. 增摩平面

4. 锁紧合页的优化结构设计

见图 6 原市面上的 PE 膜收纳盒的合页为一体式设计, 无法拆装, 对后续上 PE 膜的压膜机不是很友好。在卡扣类结构的设计探索方面, 对 U 形凸头弹簧卡扣的构造进行了分析, 发现该类型卡扣设计思路清晰、工作可靠且拆卸操作简单, 因此本方案中卡扣形式的选取提供了有益借鉴[5]。对具有自锁功能的卡扣连接结构, 自锁卡扣能够有效提高连接的抗冲击能力并降低意外松脱的风险[6]。因此, 设计圆柱形可脱卡扣, 由上环形框上设置的公扣与下环形框上设置的母扣配合构成。

基于 PETG 材料的摩擦系数 $f = 0.18$;

摩擦角: $\varphi = \arctan 0.18 \approx 10.20^\circ$;

安全最小可脱角(+5°余量): $\alpha_{\min} \approx 15.20^\circ$ 。

母扣部位设计可脱角度预设为 116° , 其单侧脱扣角为 38° , 另一侧角度为 78° ; 则实际单侧可脱倾角 $\alpha = 90^\circ - 78^\circ = 12^\circ$ 略小于 $\varphi \approx 10.20^\circ$, 实现自锁且能够承受纵向力, 在另一侧角度区域内施加特定外力可脱出公扣; 如图 7 所示结构剖面图, 该结构能够限制公扣五个自由度, 保留唯一旋转自由度, 实现合页旋转开合。关于弹簧卡扣的力学行为, 相关文献中对卡扣连接件的设计方法进行了系统梳理, 提出了



Figure 6. Leaf structure of the original PE film organizer box
图 6. 原 PE 膜收纳盒合页结构

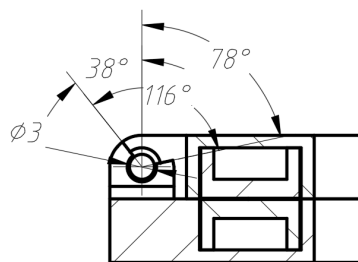


Figure 7. Cylindrical releasable clip structure planing drawing

图 7. 圆柱形可脱卡扣结构剖面图

悬臂卡扣的尺寸参数与材料选择原则，为实际工程应用提供了设计依据[7]，因此为了压紧合页，使物品能够悬浮与 PE 膜之间，本文采用悬臂弹簧卡扣限制最后的旋转自由度。

悬臂弹簧卡扣结构包含位于上环形框的母扣和位于下环形框的公扣，其中公扣采用向内扣合的方式。基于以下 PETG 材料基础数据，对预设参数进行计算检验并根据于悬臂钩卡扣结构优化的数据对该结构设计进行优化[8]。

- 弹性模量 $E = 1800 \text{ MPa}$
- 许用弯曲应力 $[\sigma] \leq 45 \text{ MPa}$
- 反复装配许用应变 $\varepsilon \leq 1.8\%$
- 塑料摩擦系数 $\mu = 0.28$
- 装配变形量 $y = 4 \text{ mm}$

1. 应变校核

$$\varepsilon = 1.5 \times hy/L^2 = 1.5 \times 0.92 \times 4/17.5^2 = 0.0180 = 1.8\%; \text{ 应变} \leq 1.8\%, \text{ 满足反复装配。}$$

2. 偏斜力 P 计算

$$P = Ebh^3y/4L^3 = 1800 \times 16 \times 0.92^3 \times 4/4 \times 17.5^3 = 1800 \times 16 \times 4/4 \times 5359.375 = 5.373 \text{ N}$$

3. 应力校核

$$\sigma = 6PL/bh^2 = 6 \times 5.373 \times 17.5/16 \times 0.92^2 = 29.844 \text{ MPa}; \text{ 应力低于屈服强度}(45 \text{ MPa})\text{无塑性变形。}$$

4. 装配力 W 计算

$$W = P \times 1 - \mu \tan \alpha / \mu + \tan \alpha = 5.373 \times 1 - 0.28 \tan 7.5 / 0.28 + \tan 7.5 = 12.559 \text{ N}$$

主要职责是控制上下环形框之间的锁紧与打开状态，确保盒盖合拢之后，内部物品能够持续维持悬浮姿态。最终优化结果如下表 2：

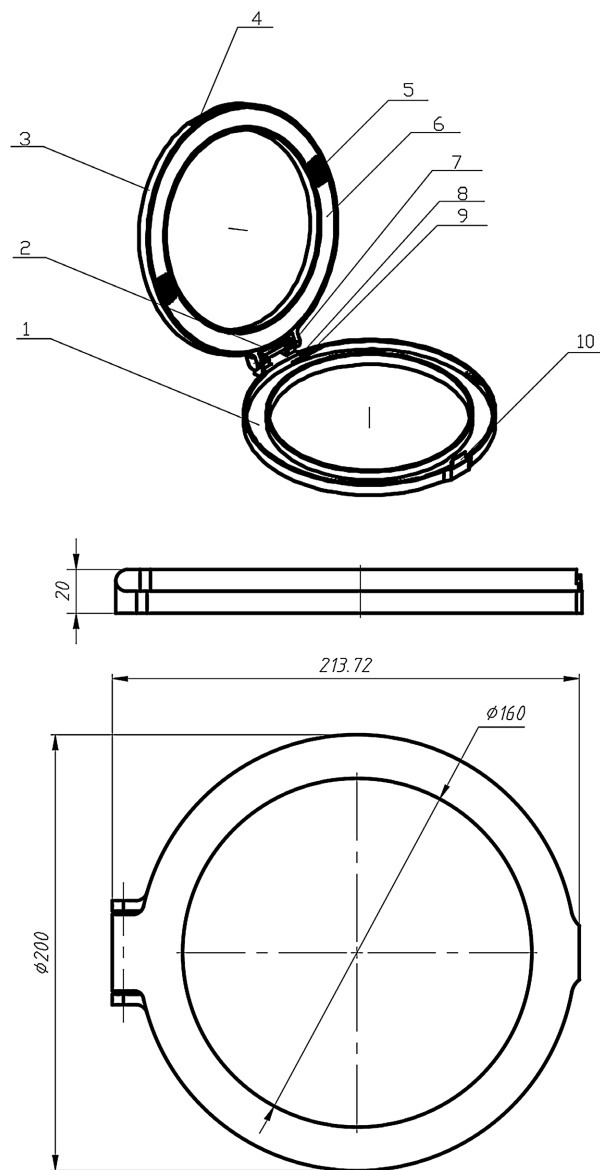
Table 2. Optimized male buckle parameters

表 2. 优化后公扣参数

参数	数值
A	1.00 mm
B	4.00 mm
C	1.00 mm
D	17.50 mm
E	2.00 mm
F	0.92 mm
G	16.00 mm
H	7.50 度

5. 螺旋扣合式 PE 薄膜悬浮收纳盒原理

该螺旋扣合式 PE 膜悬浮收纳盒的运行机理可概括为“悬浮承托 - 螺旋张紧 - 双重锁定”三个环节的协同。上环形框、下环形框与内环形框三者之间通过螺旋扣合方式形成可拆卸连接，PE 膜的边缘部位被夹持于各框体之间的配合端面上。在旋紧操作过程中，螺旋配合所产生的周向压紧力使薄膜被均匀撑展，从而构建出一个具有弹性回馈特性的悬浮承载面。此外，上下两个环形框之间还设置有圆柱形可脱卡扣及弹簧卡扣，用于实现盒盖的快速锁紧与开启，保证内部存放的小型物品能够稳定悬浮于薄膜之上，避免与刚性盒体发生直接接触，从而杜绝刮擦损伤的风险。新型 PE 膜悬浮收纳盒结构与尺寸 $427 \times 400 \times 40 \text{ mm}$ 见图 8。可收纳直径在 320 mm 内的物品。



注：1：下环形框；2：圆柱形可脱卡扣公扣；3：上环形框；4：弹簧卡扣母扣；5：抓手；6：内环形框；7：圆柱形可脱卡扣母扣；8：锁紧凸台；9：螺旋凹槽；10：弹簧卡扣公扣。

Figure 8. Organizer and packaging dimensions
图 8. 收纳盒与包装尺寸

6. 制造工艺选择

上下环形框及内环形框均选用 PETG 材料通过 3D 打印增材制造工艺加工。原市面上的 PE 膜收纳盒是 ABS 采用注塑成型的，相较于传统注塑成型，3D 打印技术无需开模，能够以较低成本实现复杂几何结构的快速成型，特别适合样品试制和小批量生产阶段的应用；相对于 ABS 材料，ABS 材料打印卡扣结构其受力比较脆弱，容易折断，见图 9 所示，因此本文采用 PETG 材料进行打印。

ABS 材料与 PETG 材料相关性能指标对比见下表 3：



Figure 9. Clip structure printed flat on ABS material
图 9. ABS 材料平放打印的卡扣结构

Table 3. Comparison of ABS and PETG materials
表 3. ABS 材料与 PETG 材料对比

性能指标	ABS	PETG	差异说明
拉伸强度	35~50 MPa	50~55 MPa	PETG 略高
弯曲模量	1.8~2.5 GPa	2.0~2.2 GPa	ABS 刚性稍强
缺口冲击强度	10~30 kJ/m ²	>80 kJ/m ²	PETG 韧性远超 ABS
硬度	洛氏 R100-R110	洛氏 106-116	PETG 硬度略高

PETG 材料本身具备良好的透明度、机械强度以及层间结合性能，其韧性远超 ABS 材料，这对卡扣结构特别友好，能够满足收纳盒框体在日常使用中的反复拆装需求。PE 薄膜采用高透明度食品级聚乙烯材料，厚度设定在 0.15 至 0.35 毫米区间，拉伸弹性模量介于 120 至 280 兆帕之间。关于聚乙烯薄膜的力学特性，在拉伸加工过程中，温度条件和拉伸倍率对 PE 膜的结晶组织形态及残余应力分布状况具有显著调控作用[9]。具体而言，较高的加工温度与适宜的拉伸倍率有利于聚乙烯分子链的结晶行为，进而优化薄膜的力学性能，这为 PE 膜用作悬浮承托材料提供了理论支撑。薄膜的固定完全依靠螺旋扣合产生的压紧力，无需使用任何胶粘剂或额外卡扣。关于增材制造工艺，需根据聚合物 3D 打印制件的力学性能设置打印层厚、填充率和打印方向等工艺参数，这对制件的强度与耐久性具有显著影响[10]。设置参数，采用平放打印，减少支撑对材料节省，同时能够提升打印速度。

7. 样品性能测试

该试验通过 3D 打印技术，打印出根据上述所设计的样品进行拆装操作、薄膜张紧状态以及薄膜可更换性等测试，本文选用耳机充电仓作为收纳对象、从方形 PE 收纳盒上拆下来的 PE 膜为试验 PE 膜。拆装操作。先将 PE 膜手工分别放置于上/下环形框，再通过扳手将内环形框分别向上/下环形框旋合压紧，

将 PE 膜张紧，随后将圆柱形可脱卡扣扣合，可实现合页的开合，最后将弹簧卡扣扣合，实现对合页的锁紧。拆盒逆向操作即可，与制作出的样品状态一致见图 10 所示。



Figure 10. Sample
图 10. 样品

薄膜张紧状态。将 PE 膜装入环形框后与方形框对比 PE 膜展平状态见图 11 所示方形框与环形框 PE 膜展平对比。环形框 PE 薄膜表面保持平整，周向张紧均匀，四周受力状态比较均衡，在薄膜中央放置收纳对象后，未出现局部松弛或一侧过紧的情况如图 12 所示。



Figure 11. Comparison of square frame and ring frame PE film spreading
图 11. 方形框与环形框 PE 膜展平对比



Figure 12. Surface condition of PE film
图 12. PE 薄膜表面状况

薄膜可更换性。将内环形框旋出后，旧薄膜可被轻松取下，重新换装薄膜并旋紧后，张紧效果与初始样品基本一致，这表明薄膜单独更换的方案是可行的。如图 13 所示 PE 膜拆卸状态。



Figure 13. PE film disassembly status

图 13. PE 膜拆卸状态

最后将环形框组装并放入物品测试密封性如图 14 所示组装并放入收纳对象后的状况，密封性良好物品无疏松移动情况。



Figure 14. Condition after assembling and putting in the storage object

图 14. 组装并放入收纳对象后的状况

8. 结语

本研究针对现有 PE 膜悬浮收纳盒存在的薄膜受力不均、张力难以控制、损坏后无法单独更换、整体报废率高的痛点，设计了一种新型螺旋扣合式 PE 膜悬浮收纳盒，并通过理论分析与 3D 打印样品的性能测试完成验证。在设计阶段，模块化的内环形框结构，实现了薄膜的快速拆装与单独更换，符合循环经济理念。理论分析表明，螺旋旋紧方式可使薄膜张力均匀分布，卡扣结构可保证反复开合的可靠性。性能测试结果验证了设计的有效性：拆卸与重装过程徒手即可完成；PE 薄膜在旋紧后表面平整，周向张力均匀，放置收纳对象后无局部松弛或一侧过紧现象，悬浮效果稳定；更换旧薄膜后，新薄膜的张紧效果与初始样品基本一致，证明了薄膜可更换方案的可行性。同时，测试表明该结构具备良好的防尘防潮能力，且薄膜损坏后可单独更换，无需报废整个盒体，有效降低了资源浪费，具有良好的市场前景和环保价值。本研究的不足在于，手工组装压膜过程中薄膜张力难以精确量化控制，后续研究将重点开发自动旋转式压膜机构，并引入张力测试与有限元仿真分析，进一步优化参数与卡扣结构的疲劳寿命，提升产品性能的稳定性与可量产性。

参考文献

- [1] 巩桂芬, 王露露, 王古月, 陈宁. 新型悬浮包装的设计与实现[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 102-105.

- [2] 高友超, 陈正勇, 常方杰. 一种带异形环叉的螺旋扣[P]. 中国, CN96248762.7. 1998-09-02.
- [3] 全国人类工效学标准化技术委员会. GB/T 16252-2023 成年人手部尺寸分型[S]. 北京: 中国质检出版社, 2023.
- [4] 杨娟, 刘灵祥. 汽车内饰手握件舒适性的截面设计[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2022(4): 29-33.
- [5] 陈辉洪. U形凸头弹簧卡扣[P]. 中国, CN99240766.4. 2001-06-20.
- [6] 东莞高宝模具有限公司. 一种无弹簧的按压式自锁卡扣[P]. 中国, CN202420401433.7. 2024-10-15.
- [7] 林杨明. 塑料制品悬臂卡扣连接件设计方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [8] 于海华. 悬臂钩卡扣装配有限元分析及优化设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [9] Zhang, Y., Sheng, L., Bai, Y.Z., *et al.* (2022) Experimental Investigation and Numerical Simulation for Structural Evolution and Stress Distribution during the Stretching Process. *Polymer Engineering & Science*, **62**, 2622-2640.
- [10] 陈向明, 姚辽军, 果立成, 等. 3D 打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 174-198.