

室内空调挂机的包装结构设计

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2011

方景丽 肖颖喆
张涵玥

湖南工业大学
包装工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 针对室内空调挂机包装箱长宽比过大导致抗压强度衰减、储运过程中易发生鼓包或内凹等行业难题,通过结构创新探寻高抗压强度瓦楞纸箱成为研究重点。从结构失效机理出发,将04型箱选定为关键研究对象,进而选取典型的0201型、0203型及0440型改良箱,分别采用普通与加强的5层BC楞纸板制作样本,系统进行了边压强度、空箱抗压及模拟真实仓储堆叠实验,并结合力学性能、成本及生产工艺进行多维度综合评价。实验表明,0440型改良箱凭借整板底板与多重受力板结构,展现出最优的抗压强度,能从本质上解决箱体长边薄弱问题,适合对包装强度要求较高的高端应用。0201型箱加装U型支撑板后,抗压强度亦显著提升,其抗压效率明显优于普通0201型箱与0203型箱,在常规应用场景中具有较高的性价比。上述结论为空调挂机包装的结构选型提供了数据支持与决策依据。

关键词: 瓦楞纸箱; 包装结构设计; 结构优化; 抗压强度

中图分类号: TB482

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2026)02-0085-09

引文格式: 方景丽,肖颖喆,张涵玥.室内空调挂机的包装结构设计[J].包装学报,2026,18(2):85-93.

在国际绿色贸易壁垒与产业绿色化转型的推动下,瓦楞纸板以其轻质、经济、高强度和可完全回收的特性,成为替代发泡聚苯乙烯(EPS)等非环保材料的理想选择,并已广泛应用于室内空调挂机的包装领域^[1-2]。然而,受室内挂机产品形态的制约,其包装箱普遍呈现出长宽比过大的结构特点。有研究表明,当瓦楞纸箱的长宽比超过1.5时,其空箱抗压强度将急剧下降,导致箱体在仓储堆码过程中,力学结构上最为薄弱的长边中部极易发生鼓包或内凹等失稳现象^[3],严重削弱了包装的防护功能与循环使用潜力^[4]。目前的研究多集中于瓦楞纸板自身边压强度的

提升或楞型组合的优化^[5],虽取得一定成效,但在针对箱体结构,特别是高长宽比箱型的系统性抗压强化设计方面,仍有待深入。为此,本研究基于结构功能一体化设计理念,通过对箱型进行系统性筛选与创新设计,探索适用于高长宽比室内空调挂机包装的瓦楞纸箱优化方案,旨在为行业提供兼具绿色化与高强度化特征的包装技术路径,并为其提供理论支持与实践参考^[6]。

1 包装结构失效机理

调研结果显示,用于空调的02型大长宽比包装

收稿日期:2025-11-11

作者简介:方景丽,女,硕士生,主要研究方向为材料与化工、产品包装安全与环境,E-mail:M24085600016@stu.hut.edu.cn

通信作者:肖颖喆,女,副教授,主要从事包装结构设计与制造工艺、整体包装解决方案、包装人因功效学研究,

E-mail:10595@hut.edu.cn

箱在储存和运输环节中,易出现箱体鼓包或内凹^[7]、纸箱压溃、折线处破损、内衬匹配不佳^[8]以及打包带断裂等问题,纸箱部分失效形式如图1所示。这些问题的产生,主要源于材料性能与结构设计的综合影响。



a) 0201 型内凹现象 b) 0203 型外凸现象

图1 02型纸箱在储运过程中的凹凸现象

Fig. 1 Concave and convex phenomena of type 02 carton during storage and transportation

1.1 材料性能的影响

瓦楞纸板的力学性能决定了纸箱整体抗压强度。其边压强度作为评价垂直承载能力的关键指标^[9],综合反映了原纸环压强度、楞型、层数、含水率^[10]及粘合工艺等多重因素的综合影响^[11-12]。瓦楞纸板边压强度在连接材料属性与箱体结构性能方面发挥着核心作用。

为准确获取材料的力学性能数据,对两种市售5层BC楞瓦楞纸板(普通板与加强板)进行了边压强度测试^[13]。所有试样均在温度23℃、相对湿度50%的标准环境中预处理24h^[14],其测试结果如表1所示。

表1 未印刷纸板边压强度

Table 1 Edge crush strength of unprinted corrugated board

| 纸板类型 | 楞型 | 厚度/mm | 定量/(g·m ⁻²) | 边压强度/(kN·m ⁻¹) |
|------|----|-------|-------------------------|----------------------------|
| 普通纸板 | BC | 7 | 706.00 | 17.647 |
| 加强纸板 | BC | 7 | 1020.83 | 28.407 |

测试数据表明,加强纸板的边压强度明显优于普通纸板。这一结果为后续对比“材料升级”“结构优化”及“协同优化”等技术路径,提供了关键的分析基础。

1.2 箱体结构的影响

纸箱结构与形状是影响其抗压强度的核心因素^[15]。在结构方面,箱型的选择至关重要。由于瓦楞垂直方向承载能力更强,且参与承压的纸板层数越多、层间结合的越紧密,其抗压性能通常也越高^[16-17]。在形状方面,纸箱周长与抗压强度之间呈非线性关系,

周长增长初期可提升强度,但超过临界值后,因结构失稳风险增加,强化效应反而减弱。实验结果表明,当长宽比(RL)处于1.4~1.5区间时,整体抗压强度达到峰值(见图2)。

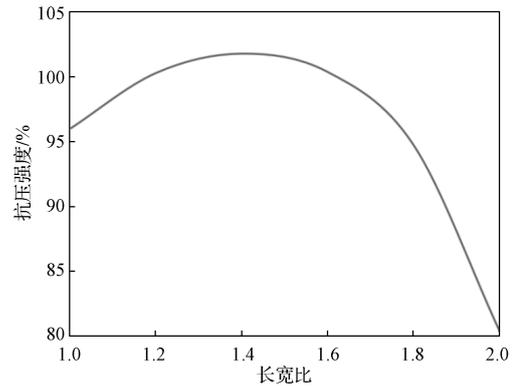


图2 02型空纸箱抗压强度与长宽比的关系

Fig. 2 Relationship between compressive strength and length-to-width ratio for type 02 empty cartons

此外,对于0201型等开槽式纸箱而言,其垂直抗压强度主要依赖于4个侧壁的整体稳定性。当箱体长宽比超过1.5时,箱体的整体抗压能力将由力学上最薄弱的长边中部区域所主导^[18]。此区域距离箱体边缘的支撑点最远,在垂直堆码载荷作用下,极易发生弹性屈曲失稳^[19],在宏观上表现为“鼓包”或“内凹”等变形现象,如图3所示。

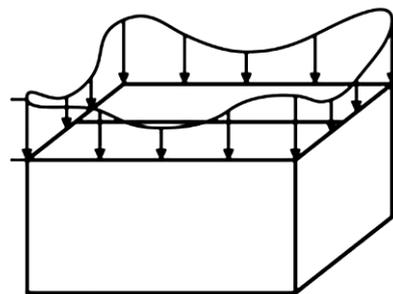


图3 0201型箱体棱壁在垂直方向上的承重情况

Fig. 3 Vertical loading capacity of four edges of type 0201 box

同时,空调挂机包装中常见的内衬布局进一步加剧了这种力学不平衡。内衬通常集中分布于箱体两端,使得短边区域因获得直接支撑而得到加强^[20];相反,长边中部则因两衬垫之间存在无支撑的“空洞”,形成了一个较大的自由跨度区域,导致应力在此集中。这一现象造成了“强者愈强,弱者愈弱”的负面效应,显著削弱了长边的有效承载能力。值得注意的是,若仅在此区域简单附加一块局部加强

板, 虽能在一定程度上缓解问题, 但并未从根本上改变长边作为整体受力构件的屈曲模型, 其强化效果有限。

2 箱体优化设计

2.1 箱体结构优化路径

基于前述失效机理的分析, 解决长边屈曲失稳是提升箱体抗压强度的核心^[21]。根据板壳结构稳定性理论, 可推导出以下两条并行的优化路径^[22]。1) 增强长边的结构刚度来抑制屈曲。其关键在于直接增加长边垂直方向的纸板层数, 将传统的单层或双层受力板结构转变为多层复合受力板。此举能显著提升长边自身的抗弯刚度, 从而增强其在垂直压力下的稳定性。2) 改善整体受力分布, 将集中在长边中部的应力进行有效分散与转移。例如, 采用整板式底板设计可避免分体式底板接缝处产生的应力集中现象, 使底部压力分布趋于均匀; 同时, 通过增设宽防尘翼, 并将其与箱体粘合以参与垂直受力, 可在长边区域等效增加纵向支撑筋, 从而有效缩短长边的实际失稳跨度。

因此, 在箱体尺寸比例已确定的条件下, 系统性解决长边失稳问题的技术方向已经明确。必须摒弃传统的 02 型箱所采用的单层侧壁结构, 转而采用能够在长边区域实现多层复合受力与优化力流分布的先进箱型, 以将理论优化路径转化为具体可行的设计方案。后续将通过实验量化评估不同箱型与材料在抗压强度及堆码稳定性方面的性能差异。

2.2 局部结构补强与前置验证

为验证上述理论路径的有效性, 并为企业提供经济可行的解决方案, 本研究先以成熟的 0201 型箱体为基础, 尝试通过局部结构补强来实现性能提升。具体而言, 设计一种 U 型支撑板 (见图 4), 并通过前置实验验证其增强效果, 从而探讨以较低成本与最小改动实现显著性能增益的可能性。

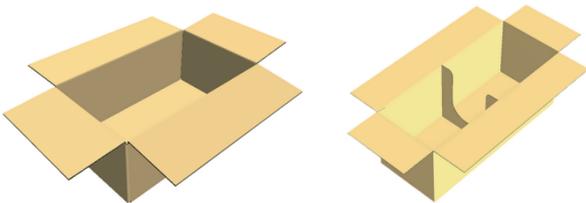


图 4 0201 型支撑板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the support plate structure for type 0201 box

采用与箱体材料相同的 U 型支撑板, 分别制备普通 0201 型箱体及加装支撑板的同型箱体样本各 10 组。所有样本均在标准环境条件下 (23℃、50%RH) 预处理 24 h, 随后依据国家标准 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》进行空箱抗压性能测试 (见表 2)。

表 2 0201 型箱体抗压性能

Table 2 Compressive performance of type 0201 box

| 纸箱箱型 | 抗压强度 /N | 抗压效率 / $(N \cdot m^{-2})$ | 抗压损失率 /% |
|------------------|---------|---------------------------|----------|
| 普通板 0201 箱 | 1412 | 1000 | 18.3 |
| 普通板 0201 箱 + 支撑板 | 2282 | 1200 | 12.7 |

上述实验结果验证了局部补强改变箱体长边的受力模式是有效的。加装支撑板后, 箱体的抗压强度与抗压效率均显著提升, 同时抗压损失率降低。该方案工艺简单、成本较低, 是中低强度应用场景下具有高性价比的优选方案。

2.3 箱型的系统性遴选与改良设计

为确保研究对象的全面性与代表性, 本研究系统筛选了国际标准箱型 (01~09 型) 进行结构优化。其中, 04 型纸箱凭借其结构完整性、工艺可行性和高潜力性的综合优势, 被选定为核心研究对象。基于箱体结构优化的理论路径, 本研究从中遴选出 3 种最具代表性的箱型 (0427 型、0431 型及 0440 型) 进行重点分析与改良设计, 相应的核心设计思想、结构创新点及优化路径详见表 3。

表 3 04 型纸箱结构优化

Table 3 Structural optimization of type 04 cartons

| 纸箱箱型 | 结构特点 | 结构优势 |
|---------|----------------------------------|-----------------------|
| 0427 型 | 无胶合锁口, 长边 6 层受力板, 宽边 3 层受力板 | 长边垂直方向 6 层受力板, 提升抗压强度 |
| 0431 型 | 防尘翼粘合翻盖式, 长边双层板, 防尘翼辅助受力 | 防尘翼参与垂直受力, 优化长边支撑 |
| 0440 型 | 整板底板, 长边 4 层受力板, 防尘板粘合锁口 | 整板底板分散压力, 长边 4 层板均衡强度 |
| 其他 04 型 | 单 / 双层板, 长边垂直方向 2~3 层, 底板分板或无防尘翼 | 无针对性改进, 结构冗余或受力板层数不足 |

其他 04 型纸箱因长边受力板层数不足, 无法系统地解决抗压骤降问题。相较于仅通过支撑板进行局部增强的方案, 另外 3 种箱型凭借其结构创新, 从根本上改善了长边的整体受力状态, 为解决抗压骤降问题提供了更为有效的路径。

2.3.1 0427 型改良纸箱

标准 0427 型箱采用无钉无胶的锁口折叠结构。改良方案通过将原结构的长与宽对调，使受力优势集中于长边，从而在长边垂直方向上有至少 6 层纸板协同受力，显著提升了长边的抗屈曲能力。0427 型纸箱结构优化前后如图 5 所示。

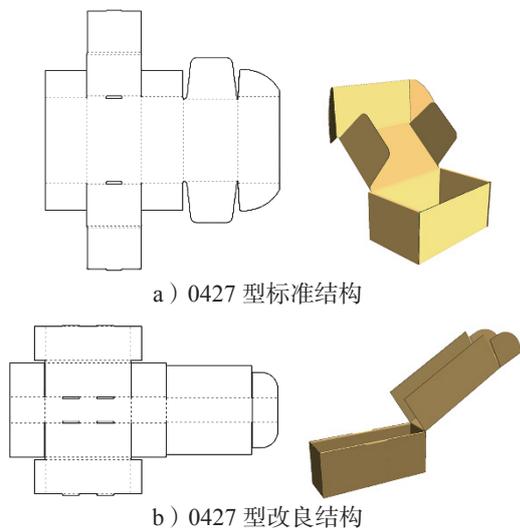


图 5 0427 型纸箱结构优化对比

Fig. 5 Comparison of structural optimization for type 0427 carton

2.3.2 0431 型改良纸箱

0431 型改良纸箱采用整板底板并与长边粘合。其结构特点在于采用翻盖式摇盖以便于内装物装箱，并使防尘翼参与垂直受力，起到纵向支撑作用，从而优化长边的载荷分布。0431 型纸箱结构优化前后如图 6 所示。

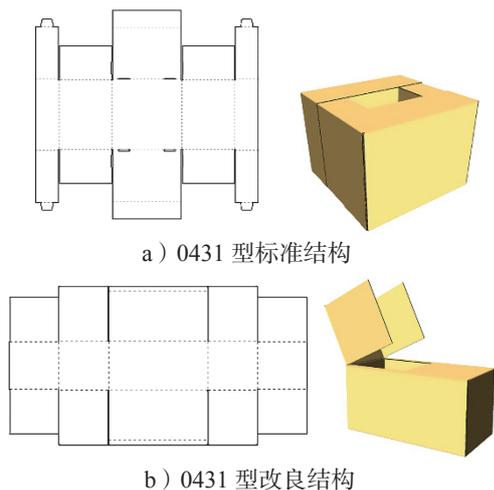


图 6 0431 型纸箱结构优化对比

Fig. 6 Comparison of structural optimization for type 0431 carton

2.3.3 0440 型改良纸箱

0440 型改良纸箱采用整板底板设计，以消除接缝处的应力集中。其核心创新在于将长边内外侧板粘合并增设宽幅防尘板，使箱体在长边垂直方向形成 4 层主要受力板。同时，防尘板作为额外的两层受力单元参与承压，从而系统性地提升了长边刚度与整体抗压强度。0440 型纸箱结构优化前后如图 7 所示。

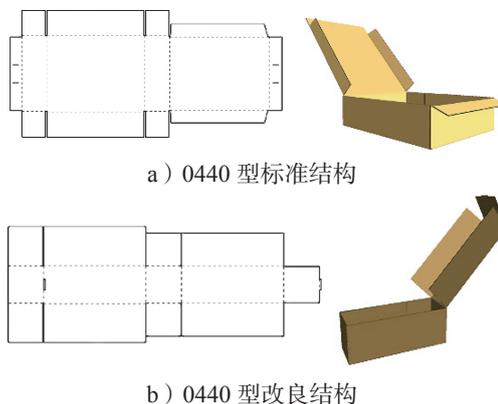


图 7 0440 型纸箱结构优化对比

Fig. 7 Comparison of structural optimization for type 0440 carton

综上所述，通过对 3 种 04 型箱型的针对性改良，本研究将理论优化路径转化为具体可行的包装结构设计方案。为验证上述优化路径的有效性，后续将以 0201 型和 0203 型作为基准箱型，与 3 种改良箱型进行对比分析。

3 实验分析

为直观分析各因素的影响并筛选出最优箱型，本研究对空调挂机瓦楞纸包装箱开展了抗压对比实验，据此选出综合性能最适宜的箱型。

3.1 空箱抗压强度实验

选取结构改良最具代表性的 0440 型箱作为 04 型箱的研究重点，将其与 0201 型箱和 0203 型箱进行空箱抗压强度对比。研究通过以下 3 个方案展开：1) 材料升级路径。采用两种不同纸板（普通板、加强板）分别制作纸箱，对比分析材料差异对抗压强度的影响。2) 结构创新路径。分别制作 0201 型和 0440 型纸箱，并与 0203 型纸箱进行抗压强度对比，以评估不同箱型结构的性能差异。3) 辅助增强路径。用纸箱的边角料制作支撑板，对比 0201 型箱加装支撑板前后的抗压强度变化，定量分析支撑板对纸箱抗压强度的贡献。所有纸箱与纸板在进行抗压强度测试

前, 均于恒温恒湿箱中按标准环境条件 (23℃, 50% RH) 预处理 24 h。抗压强度测试在抗压试验机上进行, 上压板运行速度为 10 mm/min, 记录纸箱形变与压力数据 (见表 4)。

表 4 未印刷纸箱抗压强度实验结果

Table 4 Calculation results of the compressive strength test for unprinted cartons

| 纸箱箱型 | 最大抗压力 /N |
|------------------|----------|
| 普通板 0201 型 | 1412 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 2282 |
| 普通板 0203 型 | 1055 |
| 加强板 0203 型 | 2234 |
| 加强板 0440 型 | 5930 |

表 4 数据表明, 当采用相同普通板材时, 0201 型的抗压强度 (1412 N) 显著高于 0203 型 (1055 N), 这初步验证了将 0201 型结构作为设计基准的合理性。同时, 支撑板方案进一步提升了 0201 型箱的强度, 证实了局部增强策略的有效性。此外, 材料升级同样表现出显著效果, 0203 型箱在采用加强板后, 其抗压强度提升至 2234 N。最终, 采用整板底板等设计的加强板 0440 型箱展现出更优异的性能, 其抗压强度达到 5930 N, 表明该方案在提升整体强度方面的效能远超局部加强或单纯材料升级的策略。值得注意的是, 表 4 虽然显示了各箱型的最大抗压值, 但由于不同箱型在结构上存在差异, 其展开面积和材料消耗量也有所不同。为更公平地评估各类结构的材料利用效率, 并排除面积因素的干扰, 本研究进一步引入等效抗压效率 (即最大抗压力与使用面积之比) 作为关键评价指标, 其结果如表 5 所示。

表 5 未印刷纸箱等效抗压效率

Table 5 Equivalent compressive resistance efficiency of unprinted cartons

| 纸箱类型 | 使用面积 /m ² | 等效抗压效率 /(N·m ⁻²) |
|------------------|----------------------|------------------------------|
| 普通板 0201 型 | 1.37 | 1000 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 1.88 | 1200 |
| 加强板 0201 型 | 1.37 | 2135 |
| 加强板 0201 型 + 支撑板 | 1.88 | 2570 |
| 普通板 0203 型 | 1.96 | 528 |
| 加强板 0203 型 | 1.96 | 1117 |
| 普通板 0440 型 | 2.62 | 1100 |
| 加强板 0440 型 | 2.62 | 2325 |

由表 5 可知, 在采用普通板材时, 0201 型箱的效率 (1000 N/m²) 远高于 0203 型箱 (528 N/m²),

这一结果从材料经济性角度进一步支持了将 0201 型作为基础箱型的合理性。其次, 支撑板方案使 0201 型箱的效率从 1000 N/m² 提升至 1200 N/m², 表明该方案不仅增强了结构强度, 同时也具有较好的材料利用效率。此外, 加强板 0440 型箱的效率达到 2325 N/m², 且为其同结构普通板材箱体 (1100 N/m²) 的两倍以上, 说明优质材料与该结构设计之间存在显著的协同增强效果。为进一步从结构机理层面解释这一性能差异, 对各箱型在垂直方向上的受力板层数进行了量化统计 (见表 6)。

表 6 不同箱型结构受力板层数

Table 6 Loading boards of different box types

| 纸箱箱型 | 长边垂直方向 / 层 | 宽边垂直方向 / 层 | 粘贴板 / 层 | 防尘板 / 层 |
|--------|------------|------------|---------|---------|
| 0201 型 | 2 | 2 | 0 | 2 |
| 0203 型 | 2 | 2 | 0 | 2 |
| 0440 型 | 4 | 3 | 4 | 0 |
| 0427 型 | 6 | 3 | 4 | 2 |
| 0431 型 | 2 | 2 | 4 | 2 |

从表 6 可以看出各箱型在垂直方向上的受力板构成情况。结合表 5 的数据分析, 受力板数量越多, 箱体的整体抗压能力也相应越强。

3.2 空箱堆叠实验

堆叠实验严格遵循国家标准 GB/T 4857.3—2008 《包装 运输包装件基本试验 第 3 部分: 静载荷堆码试验方法》。所有纸箱均在标准温湿环境 (23℃, 50%RH) 中预处理 24 h, 以保障条件一致。实验采用 4.0 m 和 5.2 m 两种高度专用配重块垂直加载, 各持续加载 72 h, 以模拟仓储物流环节中长期静压的效果。卸载后, 立即依据 GB/T 4857.4—2008 测定残余抗压强度并记录外观形变。为系统评价堆码稳定性, 研究构建了堆码稳定性评分 (DW) 模型, 该模型基于剩余强度率、抗变形能力及基础抗压强度等 3 项指标, 采用线性加权方法进行计算, 具体为

$$DW=4+6 \times (0.5R+0.3D_{\text{score}}+0.2S_{\text{norm}}), \quad (1)$$

式中: R 为剩余强度率;

D_{score} 为形变程度;

S_{norm} 为归一化最大抗压强度。

在评估过程中, 形变程度依据标准化观察评分卡进行量化, 堆码稳定性则采用 1~10 分的标准评分体系进行评定, 从而提高整体评估结果的一致性 (见表 7)。

表7 不同箱型堆叠实验结果

Table 7 Stacking test results of different box types

| 纸箱箱型 | 初始抗压强度 /N | 4.0 h 堆码抗压强度 /N | 5.2 h 堆码抗压强度 /N | 5.2 h 堆码抗压损失率 /% | 堆码稳定性评分 / 分 |
|------------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|-------------|
| 普通板 0201 型 | 1412 | 1153 | 压溃 | 100.0 | 7.0 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 2282 | 2050 | 1800 | 21.1 | 8.0 |
| 加强板 0201 型 | 2980 | 2800 | 2500 | 16.1 | 8.4 |
| 加强板 0201 型 + 支撑板 | 3575 | 3400 | 3200 | 10.5 | 9.0 |
| 普通板 0203 型 | 1055 | 820 | 压溃 | 100.0 | 5.6 |
| 加强板 0203 型 | 2234 | 2000 | 1800 | 19.4 | 7.6 |
| 普通板 0427 型 | 3250 | 3000 | 2800 | 13.8 | 8.6 |
| 加强板 0427 型 | 4800 | 4500 | 4350 | 9.4 | 9.2 |
| 普通板 0431 型 | 2600 | 2350 | 2200 | 15.4 | 7.8 |
| 加强板 0431 型 | 4100 | 3750 | 3600 | 12.2 | 8.4 |
| 普通板 0440 型 | 2800 | 2650 | 2500 | 10.7 | 8.8 |
| 加强板 0440 型 | 5930 | 5680 | 5500 | 7.2 | 9.6 |

由上述结果可知,在相同材料等级下,0440型箱凭借其整板底板及多重受力板所形成的协同承力结构,表现出最优的稳定性。然而,就板材而言,尽管0440型箱在同材料04型箱中表现突出,但其稳定性仍低于采用更高等级材料的加强板0427型箱。这表明在极限性能要求的场景下,“加强板材+0440型结构”是实现最高稳定性的理想组合;而对于中等堆码需求,仅优化普通板材箱型结构即可提供可靠保障。堆叠实验进一步明确了材料与结构在提升稳定性方面的协同作用关系,从而为不同应用场景下的箱型选择提供了重要依据。

4 综合评估

4.1 生产成本与工艺评估

为系统评估各候选箱型的综合可行性,本研究从经济性与生产适配性两个维度展开分析。基于市场调研结果(普通板与加强板的单价分别为5元/m²与7元/m²),计算了各箱型的材料成本与抗压效率(见表8),并引入了“抗压强度评分”这一标准化指标。

抗压强度评分(KY)通过多维度加权方式进行计算,旨在综合评估瓦楞纸箱的力学性能,克服单一指标评价的局限性。该模型将最大抗压强度、等效抗压效率及抗压损失率整合为1~10分的标准化分值,从而系统表征纸箱的综合抗压性能,并为后续与经济性指标的关联分析提供基础。具体计算公式为

$$KY = 4 + 6 \times \left[0.5 \frac{S}{S_{\max}} + 0.3 \frac{E}{E_{\max}} + 0.2 \left(1 - \frac{L}{L_{\max}} \right) \right], \quad (2)$$

式中: S 为抗压强度, N;

E 为等效抗压效率, N/m²;

L 为抗压损失率, %。

表8 不同箱型材料成本与抗压效率

Table 8 Material cost and compression efficiency of tested cartons

| 纸箱箱型 | 等效抗压效率 / (N·m ⁻²) | 使用面积 / m ² | 材料成本 / 元 | 抗压强度评分 / 分 |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|----------|------------|
| 普通板 0201 型 | 1000 | 1.37 | 6.85 | 6.0 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 1200 | 1.88 | 9.40 | 7.2 |
| 加强板 0201 型 | 2136 | 1.37 | 9.59 | 8.5 |
| 加强板 0201 型 + 支撑板 | 2570 | 1.88 | 13.16 | 9.0 |
| 普通板 0440 型 | 1100 | 2.62 | 13.10 | 7.5 |
| 加强板 0440 型 | 2325 | 2.62 | 18.34 | 9.8 |

基于抗压性能的量化结果与表9所示的生产工艺参数,本研究进一步构建了“自动化兼容性评分(DH)”,采用1~10分的标准评分体系进行评定,用以系统评估各箱型与现代自动化产线的适配性。该评分从生产效率、自动化程度及工艺成本3个维度进行综合测算,其核心计算公式为

$$DH = 1 + 9 \times [0.4PE + 0.4AD + 0.2(1 - PC)], \quad (3)$$

式中: PE 为归一化生产效率;

AD 为归一化自动化程度;

PC 为归一化工艺成本。

由上述结果可知, 0201 型箱在成本控制与生产效率方面优势突出, 适合大规模标准化生产。其加装支撑板的方案, 能够在适度提高成本的同时显著提升性能, 具备良好的性价比。0440 型箱虽然成本较高、工艺复杂, 但得益于标准化设计, 长期良品率稳定, 通过改造产线与优化工艺可实现稳定生产。

4.2 多维度性价比分析

为系统对比不同箱型多维度差异, 本研究采用归一化方法将各箱型的生产参数转换为 1~10 分的标准化评分, 以确保数据的可比性。在此基础上, 同步对比普通板与加强板的性能与成本差异, 量化材料升级带来的影响, 并评估支撑板加固这一低成本改良路径的可行性, 从而为室内空调挂机的包装设计提供全面的决策依据。各箱型在不同指标上的表现可通过雷达图直观展示 (见图 8), 相关数据如表 10 所示。

综合以上各项评价指标, 构建基于场景的包装解决方案, 以避免因片面优化单一指标而导致整体方案失衡。在实际应用中, 企业需结合具体需求与预算, 选

择最适宜的箱型结构, 从而在性能、成本与产线适配性之间取得最优平衡, 避免陷入性能浪费、成本陷阱或产线适配失误等困境。不同场景下箱型选择见表 11。

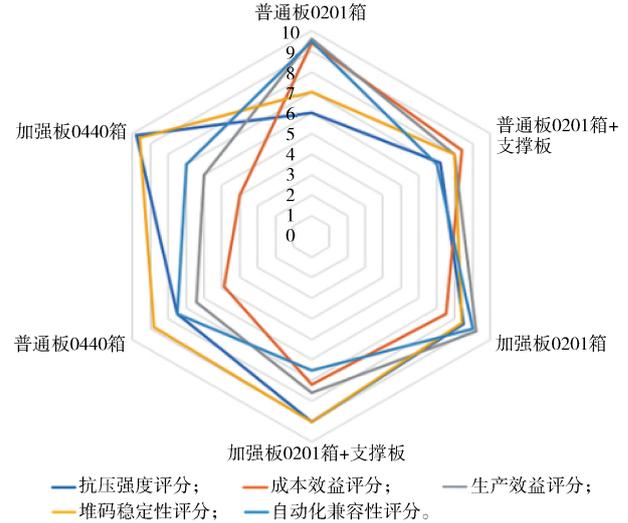


图 8 不同箱型综合评价雷达图

Fig. 8 Comprehensive evaluation radar chart of different carton types

表 9 不同箱型生产工艺参数

Table 9 Complexity of production processes for various box types

| 纸箱箱型 | 生产工序 | 生产效率 / (箱 · min ⁻¹) | 生产成本 / 元 | DH / 分 |
|------------------|--------------|---------------------------------|----------|--------|
| 普通板 0201 型 | 自动化折叠、封箱 | 120 | 2.5 | 9.5 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 自动化折叠、人工加支撑板 | 100 | 3.0 | 7.0 |
| 加强板 0201 型 | 自动化折叠、封箱 | 115 | 2.7 | 9.0 |
| 加强板 0201 型 + 支撑板 | 自动化折叠、人工加支撑板 | 95 | 3.3 | 6.5 |
| 普通板 0440 型 | 防尘板粘合、锁口固定 | 80 | 4.8 | 7.5 |
| 加强板 0440 型 | 防尘板粘合、锁口固定 | 75 | 5.2 | 7 |

表 10 不同箱型多维度评分

Table 10 Multidimensional scores of different carton types

| 纸箱箱型 | 抗压强度 / 分 | 成本效益 / 分 | 生产效率 / 分 | 堆码稳定性 / 分 | DH / 分 |
|------------------|----------|----------|----------|-----------|--------|
| 普通板 0201 型 | 6.0 | 9.4 | 9.6 | 7.0 | 9.5 |
| 普通板 0201 型 + 支撑板 | 7.2 | 8.4 | 8.0 | 8.0 | 7.0 |
| 加强板 0201 型 | 8.5 | 7.5 | 9.2 | 8.4 | 9.0 |
| 加强板 0201 型 + 支撑板 | 9.0 | 7.2 | 7.6 | 9.0 | 6.5 |
| 普通板 0440 型 | 7.5 | 4.9 | 6.4 | 8.8 | 7.5 |
| 加强板 0440 型 | 9.8 | 4.0 | 6.0 | 9.6 | 7.0 |

表 11 不同箱型实际应用适配方案

Table 11 Practical application adaptation schemes for different carton types

| 应用场景 | 推荐箱型 | 核心优势 |
|-----------|------------------|-----------------------------------|
| 自动化产线 | 普通板 0201 型 | 自动化折叠封箱效率高、成本低, 适于大批量标准化生产。 |
| 短途运输与常规仓储 | 普通板 0201 型 + 支撑板 | 抗压强度提升显著, 以低成本升级满足常规物流强度要求。 |
| 海运与高堆码仓储 | 加强板 0440 型 | 抗压强度最优, 为高压、高湿、高频搬运等恶劣物流环境提供可靠保障。 |

综上,不存在“唯一最优”的箱型,只有“最适合具体应用场景”的解决方案。0440型箱通过结构创新,在极限性能需求场景中展现出不可替代的优势。而0201型箱加装支撑板的方案,则在性能与成本之间实现了更优平衡,成为普适性场景下高性价比的选择。

5 结论

本研究通过理论分析与实验验证,系统探讨了改善室内空调挂机高长宽比包装箱抗压强度衰减问题的包装结构优化路径,并建立了基于场景的箱型适配指南。结果表明,局部补强是提升抗压性能的高性价比策略。加装支撑板具备可行性,纸箱抗压强度显著提高。箱型对比显示,0440型改良箱在结构性能方面表现最优,其整板底板与长边四层受力板的协同设计,有效抑制了长边屈曲失稳,实现了最高的抗压强度与堆码稳定性。综合评价进一步指出,不存在适用于所有场景的最优箱型,选型应结合实际应用需求。对于高强度应用场景,0440型改良箱为首选方案;而在成本敏感的常规场景中,0201型箱加装支撑板则实现了性能与成本的最佳平衡。本研究为空调挂机包装的高强度化与绿色化设计提供了理论依据与场景化选型支持。未来研究可着眼于支撑板构型的深入优化,并结合物联网传感技术,实现对包装在流通过程中实时状态的大数据监测与分析。

参考文献:

- [1] 徐丽,周信冠彤,刘心宇,等. 低碳经济下绿色快递包装纸箱的模数化研究[J]. 包装工程, 2021, 42(23): 146-154.
- [2] 贺志,向红,范小平. 家电产品运输包装发展动态与趋势[J]. 包装学报, 2025, 17(1): 23-30.
- [3] 陶宗晓. 基于运输角度的瓦楞纸包装设计优化研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(3): 120-121.
- [4] 李甫印,张暖,杨青华,等. 可循环直运快递纸箱的生命周期评价[J]. 包装学报, 2025, 17(2): 62-68.
- [5] 宋卫生,薛阳,边文慧,等. 瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 147-151.
- [6] 陈彦卿,庞玲. 基于绿色理念的快递包装设计趋势研究[J]. 生态经济, 2022, 38(12): 216-220, 229.
- [7] 许增刚,曾台英. 不同堆码型式物流包装件的稳定性分析[J]. 包装学报, 2022, 14(6): 43-51.
- [8] 肖颖喆. 瓦楞纸箱层叠式内衬与折叠式内衬结构比较: 以日用瓷器包装为例[J]. 包装学报, 2014, 6(4): 44-48.
- [9] 孙德强,李想,郝乾崇,等. 基于纸张本构模型的瓦楞纸板边压强度仿真分析[J]. 包装工程, 2025, 46(1): 155-162.
- [10] 孙爽,王军. 湿度对瓦楞纸板纵向压缩承载性能的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 178-184.
- [11] 柳云雷,王立军,陈南男,等. 固体胶对瓦楞原纸结构和疏水性能的影响[J]. 中国造纸, 2023, 42(6): 48-55.
- [12] 郑银环,王思远,吴飞,等. 湿度和运输距离对瓦楞纸箱抗压强度的影响研究[J]. 包装工程, 2023, 44(19): 258-264.
- [13] 彭子腾,郝天照,王瑞,等. 基于ANSYS瓦楞纸板等效力学性能研究[J]. 包装工程, 2024, 45(21): 192-199.
- [14] 闫畅,林青,陈斌,等. 低温干燥环境对瓦楞纸板边压强度和抗弯性能的影响[J]. 包装工程, 2025, 46(11): 70-79.
- [15] 滑广军,肖颖喆. 箱型对某空调纸箱抗压能力影响的实验分析[J]. 包装工程, 2010, 31(3): 55-57.
- [16] ZANG S R, XU L J, SUN H Y. Research on Compressive Strength of High Strength Corrugated Box Based on Finite Element Analysis[J]. Integrated Ferroelectrics, 2021, 213(1): 21-34.
- [17] 常江. 打印机缓冲包装设计及其力学性能仿真分析[J]. 包装学报, 2021, 13(5): 60-67, 74.
- [18] 滑广军,赵德坚,魏专. 大长宽比对纸箱抗压能力影响的研究与分析[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 45-47.
- [19] GARBOWSKI T, GAJEWSKI T, GRABSKI J K. The Role of Buckling in the Estimation of Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes[J]. Materials, 2020, 13(20): 4578.
- [20] 董静,李斌,侯晓琳. 空调缓冲衬垫有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 90-94.
- [21] BAKER M, HORVATH L, WHITE M. Effect of Pallet Deckboard Stiffness on Corrugated Box Compression Strength[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(4/5): 263-274.
- [22] 巩桂芬,刘雨杉,孙德强. 一种瓦楞纸箱抗压强度的计算方法[J]. 陕西科技大学学报, 2020, 38(6): 133-138.

(责任编辑:廖带莲)

Packaging Structure Design of Air Conditioner Indoor Units

FANG Jingli, XIAO Yingzhe, ZHANG Hanyue

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

Abstract: In response to industry challenges such as the excessive length-to-width ratio of air conditioner indoor unit packaging boxes leading to a decline in compressive strength and the possibility of bulging or concave deformation during storage and transportation, the research focuses on exploring high-compressive-strength corrugated cardboard boxes through structural innovation. Starting from the mechanism of structural failure, the 04 type box was selected as the key research object. Then, typical 0201 type, 0203 type, and 0440 type modified boxes were selected, and samples were made using ordinary and reinforced five-layer BC corrugated board. Systematic tests were conducted on edge compressive strength, empty box compressive strength and simulated real storage stacking experiments. Combined with mechanical properties, cost, and production processes, a multi-dimensional comprehensive evaluation was carried out. The experiments show that the 0440 type modified box, with the integral bottom plate and multiple force-bearing plates structure, exhibited the best compressive strength and can fundamentally solve the problem of weak long sides of the box, making it suitable for high-end applications with high packaging strength requirements. After the 0201 type box being equipped with U-shaped support plates, its compressive strength also significantly improved, and its compressive efficiency was significantly better than that of the ordinary 0201 type box and 0203 type box. In conventional application scenarios, it has a higher cost-performance ratio. The above conclusion provides data support and decision-making basis for the structural selection of air conditioner wall-mounted unit packaging.

Keywords: corrugated box; packaging structure design; structural optimization; compressive strength