

基于外骨骼框架的阀门包装箱仿真优化设计

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.6007

张志强 倪长华 刘军

盐城工学院
机械工程学院
江苏 盐城 224051

摘要:针对传统阀门包装箱材料利用率低、密封性不足、环境适应性差等问题,提出一种外骨骼框架与模块化嵌插系统相结合的复合结构。首先进行包装箱设计需求分析。其次,分别从性能、结构、工艺三方面开展设计。基于工程应用设计特点,采用系统最优的设计思路进行镶嵌材料、主体材料和密封材料的选型及设计。利用ANSYS对不同工况下的外骨骼包装箱进行仿真试验。仿真结果表明:所设计的阀门包装箱可以延长包装箱寿命,同时满足堆码、运输及叉装工作要求。该阀门包装箱具有广阔的应用前景。

关键词:外骨骼框架;阀门包装箱;有限元分析;模块化设计

中图分类号: TB489 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2025)06-0055-06

引文格式: 张志强, 倪长华, 刘军. 基于外骨骼框架的阀门包装箱仿真优化设计 [J]. 包装学报, 2025, 17(6): 55-60.

1 研究背景

机电产品制造业在我国的工业领域占据重要地位。阀门作为石油化工、能源输送等领域的核心部件,其运输与储存安全直接关系设备可靠性与经济性。当前,全球阀门制造企业仍普遍采用成本低廉且加工便捷的传统木质包装箱作为其主要运输载体。通过刚性框架与内部缓冲材料的组合,木质包装箱可在一定程度上抵御运输中的机械冲击、堆码压力及环境湿度的侵蚀,进而保障阀门法兰密封面、阀杆等精密结构的完整性。然而,随着现代物流环境复杂化及环保要求升级,传统木质包装箱的局限性日益凸显。其一,在海洋运输或高湿环境中,木材易受潮霉变,引发箱体结构强度衰减,导致防护失效。其二,静态堆码时,木箱抗压强度存在短板,多层运输中底层箱体会发生显著变形,增加阀门碰撞风险。其三,木质包装箱难以重复利用,单次使用后报废率超过90%,这与绿

色制造理念背道而驰^[1-5]。

近年来,学者们在优化包装设计方面进行了大量研究工作。李昭等^[6]从材料、结构和生命周期3个方面分析了减量化包装的设计方法。徐伟芳等^[7]通过有限元仿真优化跌落缓冲结构。李楠等^[8]针对复合材料包装箱在使用过程中需满足的结构强度要求,进行了轻量化研究。贺志等^[9]通过对当前家电包装现状的深入分析,提出运输包装与产品应进行协同优化设计,以降低成本。在此背景下,模块化外骨骼式包装箱应运而生。此设计摒弃传统单一材料结构,采用“金属框架+木质面板”的分层体系,通过拓扑优化构建高强度承载骨架,并结合木质板实现轻量化与抗冲击性能的协同提升。相较于传统木质包装,其核心优势体现在两方面:首先,外骨骼框架通过动态载荷分布来设计,以提升整体抗压强度,控制堆码变形量在3%以内;其次,模块化嵌插结构支持快速拆装与尺寸调节,能显著提升包装箱对不同规格产品

收稿日期: 2025-04-20

作者简介: 张志强,男,硕士生,主要研究方向为包装箱快速设计, E-mail: 1028318459@qq.com

通信作者: 刘军,男,研究员级高级工程师,主要从事机械设计与智能制造研究, E-mail: liuj@ycit.cn

的适配性，降低企业的模具投入成本。

综上，本研究聚焦于外骨骼式阀门包装箱的结构创新与综合性能优化，旨在提供一种高可靠、可持续的运输解决方案。先对阀门厂实际遇到的包装问题进行分析，再基于包装箱循环使用和保护内装物阀门零件的需求，提出外骨骼包装箱的设计方案，并使用 ANSYS 进行仿真分析。本研究的创新性体现在两方面：其一，将外骨骼框架结构概念应用于阀门运输包装领域，通过 Q235 钢骨架与定向刨花板（oriented strand board, OSB）的复合设计，有效融合了金属的高强度和木材的轻质缓冲特性，克服了单一木质材料的性能局限；其二，建立了涵盖水平冲击、静载堆码、自由跌落及叉装搬运的完整仿真验证体系，系统评估并优化了包装箱在严苛物流工况下的结构响应，确保了设计的可靠性。

2 包装箱设计原则

当前，阀门包装箱面临产品定制化、标准化与规范化的挑战。在新产品的设计中，为了满足客户定制化需求的同时，提高设计效率，一般会借助以往的成功设计案例和经验，采取按订单进行个性化设计。

阀门包装箱的主要设计原则为：

- 1) 标准包装箱外形。
- 2) 保证包装箱的结构强度。
- 3) 实现箱体的快速拆卸和安装。
- 4) 保证内置阀门零件的安全性。
- 5) 箱体在装载和运输过程中，不易出现损伤。

3 包装箱及其模型设计

由于石油管道类阀门在工业应用中的特殊性，阀门产品在体积与质量方面通常不会太小，因此所设计的阀门包装箱须具备高强度、较好承载能力。同时，阀门不易人工搬运，故包装箱设计时还须考虑便于叉

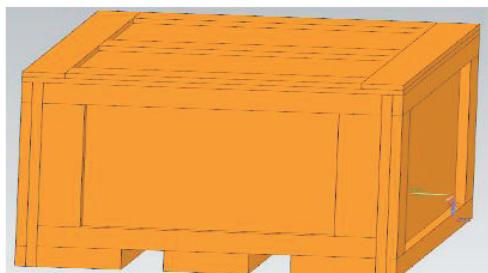
车、吊车等设备的使用。更为重要的是，低成本原则是包装箱设计时必须遵循的核心准则。这不仅要求在研发阶段实现成本控制，而且需要综合考量保障成本、使用成本、学习成本、训练成本及使用成本等^[10]。

3.1 结构设计

根据阀门厂的实际生产需求和现有阀门包装箱（如图 1 所示）的使用情况，本课题组发现部分阀门产品属于大质量零件，这导致包装箱在使用过程中极易受到破坏，进而影响包装箱的重复使用。现有阀门包装箱的材料为松木。松木是一种各向异性材料，其应力 - 应变关系存在耦合效应，具体表现为：正应力可以引起剪应变，剪应力可以引起正应变，一个方向的剪应力可以引起另一个平面的剪应变。这些都是由其本身物理特性所决定。松木的各向异性可以通过 9 个工程弹性常数^[11-12]来描述，具体数据如表 1 所示。



a) 实物图



b) 三维模型

图 1 现有阀门包装箱

Fig. 1 Existing valve packaging box

表 1 松木力学参数

Table 1 Mechanical parameters of pine

| 密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量 /MPa | | | 剪切模量 /MPa | | | 泊松系数 | | |
|---------------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 纵向 | 横向 | 弦向 | 纵横向 | 横弦向 | 纵弦向 | 纵横向 | 横弦向 | 纵弦向 |
| 450 | 9171.0 | 460.4 | 831.6 | 521.7 | 44.5 | 666.7 | 0.558 | 0.337 | 0.472 |

为降低成本以及提高包装箱结构强度、拆装便捷性和材料利用率，本研究对现有阀门包装箱进行结构优化，采用外骨骼式框架结构，主框架由 H 型钢带

构成，内部嵌插可拆卸木板，以形成封闭腔体。

主框架：采用 Q235 冷弯型钢，通过拓扑优化确定截面尺寸为 600 mm × 150 mm。

嵌插木板：采用 OSB，厚度为 10 mm，通过燕尾榫插接，与主框架连接。

密封设计：在框架接缝处灌注聚氨酯密封胶，嵌插木板与框架接触面粘贴三元乙丙橡胶条（ethylene propylene diene monomer, EPDM）。

3.2 材料选择

主框架：Q235 冷弯型钢，屈服强度为 235 MPa。

嵌插木板：OSB，密度为 600 kg/m³，抗弯强度为 20 MPa。

密封材料：EPDM，常温下压缩率为 10%~20%。

3.3 有限元模型搭建

对框架木箱的主要构件进行测量，并按照其实际尺寸参数，构建框架木箱各个部分的三维模型，然后将各个零件在 NX 软件中进行装配，得到框架木箱的三维实体模型。根据建好的三维模型，按照设计要求对其外部进行外骨骼框架设计。依据阀门的尺寸参数，可以调节三维模型的框架尺寸，以满足不同尺寸阀门的装载与运输需求，如图 2 所示。本研究以可装载 4 件 6 寸 150 磅阀门的外骨骼包装箱为研究对象。

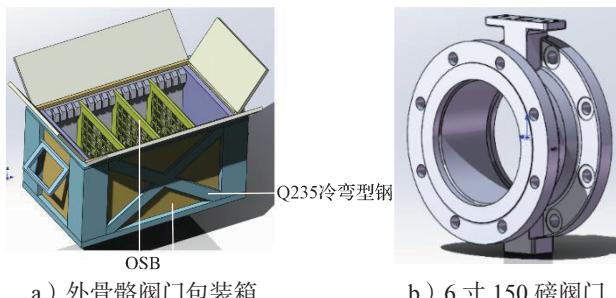


图 2 产品三维模型

Fig. 2 Product 3D model

4 包装箱性能测试

在运输与作业场景中，跌落、冲击、碰撞、叉装、堆码等事件极易引起包装件损坏，这对阀门零部件的包装安全性提出了严峻挑战^[13~14]。在正常操作环境下，要确保阀门包装箱的有效载荷，更重要的是，在事故发生时，要确保阀门包装箱结构的完整性^[15]。

4.1 水平碰撞试验

根据 GB/T 4857.11—2005《包装 运输包装件基本试验 第 11 部分：水平冲击试验方法》^[16]的要求，测试所设计的阀门包装箱在受到水平冲击时的耐冲击强度和对内装物的保护性能，进而评估阀门包装箱在运输中的结构性能。

4.1.1 试验前期准备

基于 GB/T 5398—2016《大型运输包装件试验方法》^[17]，建立外骨骼式阀门包装箱的承压仿真试验体系。依据工厂提供的包装箱实际数据，采用 NX 软件建立模型，其中，Q235B 钢带厚度为 (2.5 ± 0.2) mm，杨氏模量为 210 GPa。由于软件中没有松木的力学参数，故通过资料查询可拆卸松木板材（含水率 <12%）的各向异性弹性参数。然后，在 ANSYS Workbench 软件的材料数据库中，输入松木各向异性弹性参数（见表 1）。

4.1.2 有限元分析

预先设定好刚性壁，对运输过程中包装箱可能出现的碰撞现象进行分析，观察包装箱侧面撞击变形程度。由于要考虑包装箱外骨骼的变化情况并减少试验计算时间，故降低阀门网格划分精度，将撞击面网格加密，以显示应力传递过程。以 2.5 m/s 的水平冲击速度，位移 20 mm 时，包装箱水平碰撞的变形云图如图 3 所示。包装箱的外骨骼变形量仅约为 0.0012 mm，最大变形位于箱体内部隔板上。

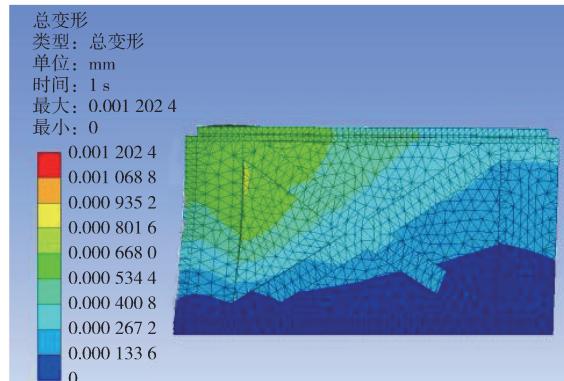


图 3 水平碰撞变形云图

Fig. 3 Contour of horizontal collision deformation

4.2 堆码试验

根据 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》^[18]的要求，模拟仓储或运输中多层堆码时包装箱的受力情况，以评估包装箱在长期堆码下的抗压能力和稳定性。

4.2.1 试验前期准备

依据 GB/T 4857.3—2008 以及工厂实际堆码情况，本试验采用三层堆码。在仿真平台，约束包装箱底部自由度，在顶面施加均布压力，此压力等效于上层所有包装箱的重量加上阀门重量。根据式 (1) 得到各包装箱顶面的载荷 (F)。其中，底层箱的静载

荷工况为 2959.4 N。

$$F = K(n-1)(m_1+m_2)g, \quad (1)$$

式中: K 为安全系数, 取值 1; n 为仓储允许堆放的最大层数, $n=3$; m_1 为包装箱质量; m_2 为阀门质量; g 为重力加速度。

4.2.2 有限元分析

在等效两倍地球重力加速度堆码载荷下, 堆码有限元分析结果如图 4 所示。

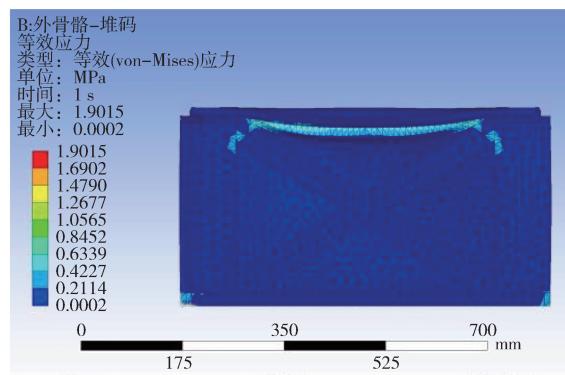
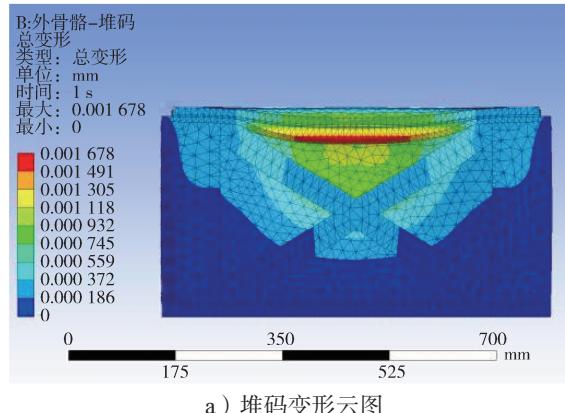


图 4 堆码有限元分析结果

Fig. 4 Stacked finite element analysis results

由图 4 可知, 结构上呈现典型应力梯度分布, 这是因为包装箱侧面有两根交叉的加强筋结构。和原有木制包装箱相比, 外骨骼包装箱的应力集中于上方两条钢带上, 其最大等效应力为 1.9 MPa, 而相对变形量仅约为 0.0017 mm。该变形量远低于工厂对储存货物包装箱的变形允许值。此外, 相对于传统木质包装箱, 外骨骼包装箱减少了木板的使用, 有利于工厂的经营成本进一步降低。

4.3 跌落试验

在复杂的作业环境下, 包装箱易遭受跌落冲击。故依据 GB/T 4857.5—1992《包装 运输包装件 跌落试验方法》^[19] 的要求, 对模型进行跌落试验。跌落

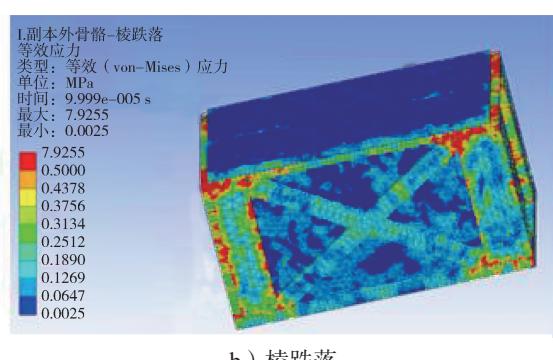
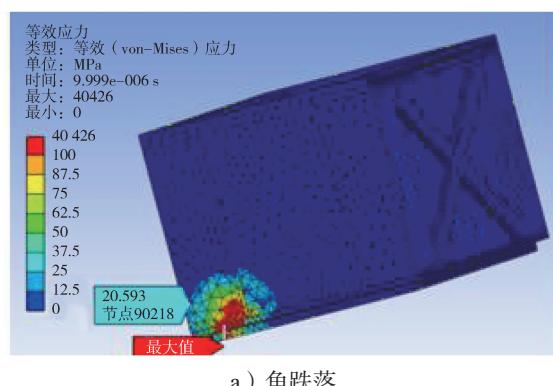
试验的模拟工况为: 试验人员使用吊装设备(如吊带、吊钩等)按预定方式吊起包装箱至预定高度, 然后按照其预定状态自由下落, 与冲击台面相撞。记录跌落过程中各项数据, 得到包装箱的面跌落、角跌落和棱跌落数据。

4.3.1 试验前期准备

首先对外骨骼包装箱的框架及各零件的模型进行构建, 然后装配成整体模型, 再导入 ANSYS Workbench 软件, 转化为 CAE 模型, 接着在仿真平台进行前处理, 最后进行跌落工况的模拟分析。

4.3.2 有限元分析

在 ANSYS LS-DYNA 软件中, 设定跌落高度为 500 mm, 下方设置一个刚性壁, 以初速度为 0 m/s 的自由落体状态, 进行底面跌落、棱跌落(侧边短棱)、角跌落(底-长-宽角)3 种典型工况仿真试验。外骨骼包装箱的等效应力如图 5 所示。在角跌落、面跌落以及棱跌落中, 包装箱所承受的应力均未超出其屈服强度的阈值。角跌落下, 包装箱应力最大处位于阀门与隔板接触点, 外骨骼处最大应力约为 100 MPa。棱跌落下, 由于外骨骼包装箱侧面有加强筋的支撑, 其应力集中于两端交界处, 最大应力约为 7.93 MPa。面跌落下, 包装箱的应力集中于 4 个角, 最大应力约为 3.33 MPa。



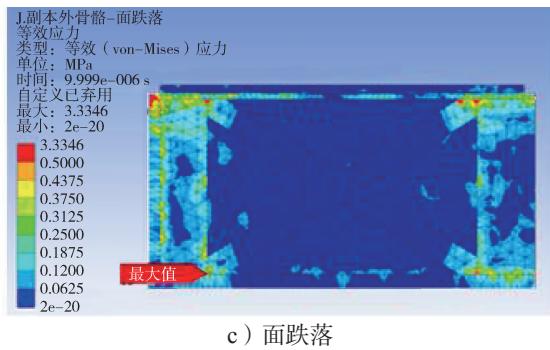


图 5 不同跌落工况下的应力云图

Fig. 5 Stress contours under different drop conditions

4.4 叉装试验

根据 GB/T 4996—2014《联运通用平托盘 试验方法》^[20]中的叉车搬运试验要求, 使用叉车对包装箱进行装卸模拟, 测试叉齿插入、搬运过程中包装件的稳定性及损伤情况。记录叉齿对包装箱底部的冲击、变形及内部产品的位移情况。

4.4.1 试验前期准备

参照 ISTA 3E 标准, 构建叉齿动态插人工况, 其中叉齿厚度为 50 mm, 插入速度为 0.5 m/s。在搬运过程中, 木箱的底部会受到叉车叉齿的力作用^[21]。相较于整体平面受力, 在两条叉齿下木箱受到的载荷力更为集中, 故需要对此进行受力分析。在 ANSYS Workbench 软件中, 将包装箱底部两处固定住, 施加重力载荷, 并对其进行受力分析。

4.4.2 有限元分析

在木箱底部, 引入两条长方体结构, 以模拟叉车货叉, 并对其实施网格划分, 随后开展受力分析, 模拟结果如图 6 所示。外骨骼包装箱所受最大等效应力约为 1.88 MPa, 最大变形量为 0.000 68 mm, 且由于受重力影响, 包装箱的应力集中位于叉齿两端。显然, 最大等效应力小于木材强度 (10.2 MPa), 这说明该状况下木箱结构安全。

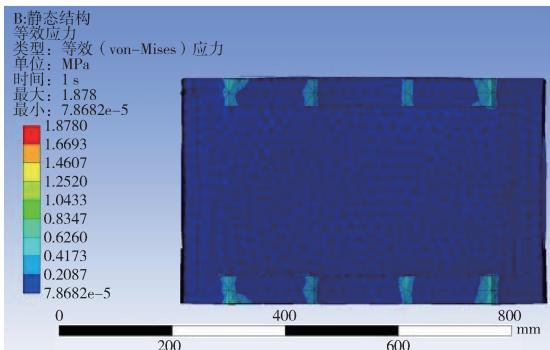


图 6 叉装应力云图

Fig. 6 Fork lifting stress contour

5 结语

随着工业物流环境的复杂化与环保理念的深化, 传统阀门包装箱在结构强度、环境适应性及可持续性等方面所表现出的局限性日益显著。针对上述问题, 本研究提出了一种基于外骨骼框架的优化设计方案。外骨骼框架通过拓扑优化与动态载荷分布来设计。采用“金属骨架 + 木制隔板”的分层体系与模块化嵌插设计, 实现了高强度、轻量化的协同优化。钢带主骨架与定向刨花板的组合, 既保留了金属材料的高强度特性, 又降低了整体质量。模块化嵌插系统支持多规格阀门的快速适配, 显著降低了企业的模具开发成本。此外, 模块化设计支持快速拆装与部件更换, 进一步延长了包装箱的使用寿命, 契合绿色制造与循环经济的发展趋势。从实际应用角度看, 本设计不仅显著提升了包装箱的力学性能与环境适应性, 还为阀门运输的全生命周期管理提供了技术支撑, 具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李二波, 杜吉祥. 关于仓库产品包装箱防潮防霉研究与应用 [J]. 日用电器, 2017(10): 74–77.
- [2] FRESE M, ENDERS-COMBERG M, BLAB H J, et al. Compressive Strength of Spruce Glulam[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2012, 70(6): 801–809.
- [3] PÁLKOVÁ Z, RUDOLFOVÁ M, GEORGIN E, et al. Effect of Handling, Packing and Transportation on the Moisture of Timber Wood[J]. International Journal of Thermophysics, 2017, 38(10): 153.
- [4] 申远. 胶合板与实木材料力学性能实验研究与仿真分析 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- [5] 朱翔. 一种循环复用木质包装箱及木托盘齿板拼接制造技术的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- [6] 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.
- [7] 徐伟芳, 谢若泽, 钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术 [J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25–30.
- [8] 李楠, 刘雷波, 龚文化, 等. 复合材料包装箱结构轻量化设计仿真技术研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(23): 307–314.
- [9] 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.
- [10] 赵吉敏, 汪文森, 回成月, 等. 军用卡扣式可拆装包装箱应用研究 [J]. 包装工程, 2018, 39(21): 235–240.

- [11] 沈仙法, 崔小龙. 基于 Ansys Workbench 的机电产品木质包装箱的结构优化 [J]. 包装工程, 2020, 41(13): 104–110.
- [12] 崔小龙. 某型机电包装箱静动态力学性能分析及结构优化 [D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [13] 李志强, 李海玲, 陈璇希, 等. 基于 LS-DYNA 水槽式洗碗机运输包装件的跌落仿真分析 [J]. 包装学报, 2025, 17(2): 10–17.
- [14] 董 静, 李家成, 余楚倩, 等. 钢琴运输包装设计及有限元仿真分析 [J]. 包装学报, 2022, 14(4): 56–62.
- [15] 常 江. 打印机缓冲包装设计及力学性能仿真分析 [J]. 包装学报, 2021, 13(5): 60–67, 74.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 包装运输包装件基本试验 第11部分: 水平冲击试验方法: GB/T 4857.11—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 大型运输包装件试验方法: GB/T 5398—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 包装运输包装件基本试验 第3部分: 静载荷堆码试验方法: GB/T 4857.3—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1.
- [19] 国家技术监督局. 包装运输包装件 跌落试验方法: GB/T 4857.5—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 联运通用平托盘 试验方法: GB/T 4996—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1.
- [21] 石军键, 李 光. 不同工况下钢架木箱有限元分析及优化设计 [J]. 包装与食品机械, 2016, 34(2): 37–40.

(责任编辑: 邓 彬)

Simulation and Optimization Design of Valve Packing Box Based on Exoskeleton Framework

ZHANG Zhiqiang, NI Changhua, LIU Jun

(School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: To address the issues such as low material utilization, inadequate sealing, and poor environmental adaptability in traditional valve packaging boxes, a composite structure combining an exoskeletal frame with a modular insertion system is proposed. First, the packaging box design requirements are analyzed. Subsequently, the design is developed from three aspects of performance, structure, and manufacturing process. Based on engineering application characteristics, a system-optimization approach is adopted for selecting and designing the insert materials, main body materials, and sealing materials. ANSYS simulations are performed on the exoskeleton packaging box under various operating conditions. The simulation results demonstrate that the designed valve packaging box can extend the box's service life while meeting stacking, transportation, and forklift handling requirements. This valve packaging box holds broad application prospects.

Keywords: exoskeleton frame; valve packaging box; finite element analysis; modular design