

机械工程技术对集装箱轻量化设计的推动作用探究

张洪勇

天津中集集装箱有限公司, 天津 300461

DOI:10.61369/ERA.2025060006

摘要：在全球贸易蓬勃发展以及环保、成本控制要求趋严的背景下，集装箱轻量化设计成为行业关键需求。机械工程技术持续创新为其提供了有力支持。在设计理论方面，拓扑优化、模块化设计等先进理念以及多学科协同设计方法，优化了集装箱结构与材料选择；材料工程技术创新带来铝合金、碳纤维增强复合材料等轻质材料的应用，同时提升了现有材料性能；机械制造工艺的优化，如激光切割、搅拌摩擦焊接等先进工艺的应用，以及制造工艺的创新，保障了轻量化设计的实现。这些技术共同作用，降低了集装箱运输能耗，提高了运输效率，推动了集装箱运输行业的可持续发展，并且随着机械工程技术进步，集装箱轻量化设计前景广阔。

关键词：机械工程技术；集装箱轻量化设计；设计理论革新；材料工程技术；制造工艺优化

Research on the Role of Mechanical Engineering Technology in Promoting the Lightweight Design of Containers

Zhang Hongyong

Tianjin CIMC Containers Co., Ltd. Tianjin 300461

Abstract： In the context of booming global trade and increasingly stringent environmental protection and cost control requirements, lightweight container design has become a key demand in the industry. Continuous innovation in mechanical engineering technology has provided strong support for this. In terms of design theory, advanced concepts such as topology optimization and modular design, as well as multidisciplinary collaborative design methods, have optimized container structure and material selection. Innovations in materials engineering technology have led to the application of lightweight materials such as aluminum alloys and carbon fiber-reinforced composites, while improving the performance of existing materials. The optimization of mechanical manufacturing processes, such as the application of advanced processes like laser cutting and friction stir welding, as well as innovations in manufacturing processes, have ensured the realization of lightweight design. These technologies work together to reduce energy consumption in container transportation, improve transportation efficiency, and promote the sustainable development of the container transportation industry. With the advancement of mechanical engineering technology, the lightweight design of containers has broad prospects.

Keywords： mechanical engineering technology; lightweight design of containers; innovation in design theory; materials engineering technology; optimization of manufacturing processes

引言

在全球化经济浪潮的强劲推动下，集装箱运输凭借装卸高效、转运便捷等显著优势，已然成为国际贸易货物运输的中流砥柱。近年来，全球贸易量呈持续攀升态势，与此同时，环保标准和成本控制要求愈发严苛。在此背景下，集装箱的轻量化设计成为行业突破发展的关键方向。机械工程技术作为一门综合性学科，凭借在材料力学、结构优化等理论层面，以及加工工艺等实践环节的持续创新，为集装箱轻量化设计筑牢技术根基，显著推动该领域的创新发展。下文将深入探讨其推动作用。

一、机械工程设计理论革新助力集装箱轻量化设计

在集装箱设计迈向轻量化的进程中，机械工程设计理论层面的革新发挥着极为关键的引领作用。它从理念革新与方法优化两个维度出发，为集装箱轻量化设计注入了全新的活力，极大地推

动了行业的技术进步。以下将从先进设计理念的引入以及多学科协同设计两个方面，深入探讨其在集装箱轻量化设计中的助力作用。

（一）先进设计理念的引入

机械设计是一种将机械的工作原理、运动模式、力和能量传

输方式、结构、外在形式等作为基础，通过构思、集成、计算和归纳，最终使机械装备具备预期性能的设计^[1]。机械工程设计理论的持续演进，为集装箱轻量化设计开辟了前所未有的路径。过去，集装箱设计多将重点置于强度和耐用性上，对重量的考量相对不足。但现代机械设计理论秉持创新思维，强调在满足多样化功能需求的基础上，借助优化结构与合理选择材料来达成产品的轻量化。

以拓扑优化理论为例，其核心在于对结构的材料分布进行科学优化。通过精确的算法和模拟分析，精准识别并去除那些对结构性能贡献较小的材料部分，在不损害结构整体性能的情况下，显著减轻结构重量^[2]。将这一理论应用于集装箱设计时，能够针对集装箱的框架结构进行深度优化，精准确定材料的最优分布，有效减少冗余材料，进而推动集装箱实现轻量化。

模块化设计理念在集装箱轻量化进程中同样发挥着重要作用。模块化设计把集装箱拆分为多个功能模块，每个模块都具备独立设计、制造和组装的特性。在这一过程中，针对每个模块采用轻量化材料，并进行精心的结构设计优化，实现各个模块的轻量化。随后，将这些轻量化的模块进行有序组装形成完整的集装箱。如此一来，既能够充分保证集装箱在运输等实际应用场景中的整体性能，又成功达成了轻量化的设计目标，为集装箱行业的发展注入新的活力。

（二）多学科协同设计

集装箱的轻量化设计是一项极具复杂性的系统工程，它深度融合机械、材料、力学等多个学科领域，每个学科都在其中扮演着不可或缺的关键角色^[3]。机械工程领域所倡导的多学科协同设计方法，恰似一条纽带，将各学科的独特优势紧密整合，为实现集装箱的优化设计提供了有力保障。

在集装箱的设计过程中，机械工程师肩负着整体架构规划的重任，他们需要综合考虑运输需求、空间利用以及制造工艺等诸多因素，精准确定集装箱的外形尺寸和框架结构，为后续的设计工作奠定坚实基础。材料科学家则依据机械工程师提出的设计要求，深入研究并筛选适配的轻量化材料。这不仅涉及对各类新型材料的探索，还需要对所选材料的强度、密度、耐腐蚀性等关键性能进行严格的测试和评估，确保其能够满足轻量化与功能性的双重需求。力学专家通过运用专业知识，对集装箱在不同运输工况下的受力情况展开全面分析，从静态承载到动态冲击，精确模拟各种受力场景^[4]。基于这些分析结果，他们为结构设计和材料选择提供可靠的理论依据，从而保障集装箱在减轻重量的同时，依然具备足够的强度和稳定性，能够安全、可靠地投入使用。通过多学科的紧密协作，各学科的优势得以充分发挥，实现了集装箱轻量化设计的最优化，推动集装箱行业朝着更高效、更环保的方向发展。

二、材料工程技术创新为集装箱轻量化提供物质基础

在集装箱轻量化的探索进程中，材料的革新是实现这一目标的物质根基。材料工程技术的持续创新，不仅为集装箱轻量化提

供了多样化的轻质材料选择，还进一步挖掘现有材料的潜力，提升其性能。这不仅有力地推动了集装箱轻量化设计的实现，还为整个行业的可持续发展筑牢了基础。下面将从轻质材料的研发与应用、材料性能的提升与改进两个方面进行详细阐述。

（一）轻质材料的研发与应用

随着材料工程技术持续创新，为集装箱轻量化设计创造了极为有利的条件，提供了种类丰富的轻质材料选择。铝合金凭借其突出特性，成为当前集装箱轻量化设计中应用广泛的材料^[5]。它密度低，意味着在保证结构完整性的同时可有效减轻重量；强度高，能够承受运输过程中的各种应力；耐腐蚀性能优异，大大延长了集装箱的使用寿命。与传统钢制集装箱相比，铝合金集装箱重量能减轻20%~30%，而且具备良好的隔热、隔音性能，在侧板、顶板和底板等部件采用铝合金，能直接降低集装箱整体重量，提升运输效率。

复合材料，像碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料等，在集装箱轻量化设计领域展现出巨大潜力。它们比强度高，在承受相同载荷时可减少材料用量；比模量高，保证结构具有良好的刚性；可设计性强，这一特性尤为关键。以碳纤维增强复合材料为例，用其制成的集装箱比传统钢制集装箱重量轻30%~50%，大幅降低运输能耗^[6]。同时，根据集装箱不同的使用场景，如长途海运、内陆运输等，复合材料能够定制不同的材料结构和性能，满足多样化需求，为集装箱轻量化设计开辟了新的发展方向。

（二）材料性能的提升与改进

在集装箱轻量化设计的材料研发领域，除了积极探寻新型轻质材料，材料工程技术还聚焦于提升和优化现有材料性能，以此契合集装箱轻量化设计的严苛要求。通过表面处理、合金化等一系列专业技术手段，能够有效增强材料的强度、硬度以及耐腐蚀性等关键性能，在维持材料性能稳定的基础上，合理减少材料的使用量，进而达成集装箱的轻量化目标^[7]。

以钢材为例，表面涂层处理是一种广泛应用且效果显著的技术。在钢材表面覆盖特定涂层，能够在其表面形成一层保护膜，有效阻隔外界腐蚀性物质的侵蚀，显著提高钢材的耐腐蚀性能。这不仅延长了钢材的使用寿命，还意味着在满足使用要求的情况下，可以适当减少钢材的厚度。厚度降低，钢材重量自然减轻，直接推动了集装箱的轻量化进程。

合金化技术同样发挥着重要作用。在钢材中精准添加适量的锰、硅、铬等合金元素，这些元素会与铁基体发生复杂的物理化学反应，从而改变钢材的组织结构。锰元素能有效提高钢材的强度和韧性，增强其抵抗变形和断裂的能力；硅元素有助于提高钢材的强度和硬度；铬元素则主要提升钢材的耐腐蚀性。通过合金化，钢材在实现轻量化的同时，依然能够具备足够的强度和韧性，满足集装箱在各种复杂运输环境下的使用要求。

三、机械制造工艺优化保障集装箱轻量化设计的实现

在集装箱轻量化设计从理念走向现实的过程中，机械制造工

艺发挥着不可替代的保障作用。制造工艺的持续优化，不仅让先进技术得以落地实施，还通过创新手段不断突破原有局限，为轻量化设计目标的达成提供了坚实支撑。以下将从先进制造工艺的应用以及制造工艺的优化与创新两个维度，深入探讨其对集装箱轻量化设计的推动作用。

（一）先进制造工艺的应用

机械制造工艺的持续进步，为集装箱轻量化设计的落地实施构筑起坚实的技术保障体系。其中，激光切割技术凭借诸多突出优势，在集装箱制造领域获得了广泛应用。其切割精度极高，能够以极高的准确性切割出各种复杂形状的零部件，确保尺寸误差控制在极小范围内^[9]。同时，切口质量良好，边缘光滑整齐，无需额外的精细加工，有效提升了生产效率。而且，热影响区小，极大地减少了对切割部件材质性能的不良影响。通过采用激光切割技术，能够最大限度地减少材料的浪费，显著提高材料的利用率。这不仅降低了集装箱的制造成本，还直接减轻了集装箱的重量，为轻量化设计提供了有力支持。

焊接技术作为集装箱制造的核心工艺，对集装箱的强度和密封性起着决定性作用。近年来，随着焊接技术的不断创新发展，搅拌摩擦焊接、激光焊接等新型焊接工艺逐渐在集装箱制造中崭露头角。以搅拌摩擦焊接为例，它具有焊接接头强度高的特点，能够使焊接部位的力学性能与母材相近甚至更优，确保集装箱整体结构的稳固^[9]。而且，该工艺在焊接过程中产生的变形极小，几乎不会出现焊接缺陷，有效提高了集装箱的焊接质量。与此同时，由于焊接质量的提升，可适当减少焊接材料的使用量，进而实现集装箱的轻量化目标，有力推动了集装箱制造行业的发展。

（二）制造工艺的优化与创新

在集装箱轻量化设计的推动下，机械制造企业积极应对挑战，不断在制造工艺上进行优化与创新。在生产流程方面，企业深入剖析每一个环节，对工艺流程展开全面且细致地优化。通过严谨地分析与研究，去除那些不必要的加工工序，使生产过程更加简洁高效。这一举措不仅极大地提高了生产效率，减少了生产周期，还显著降低了生产成本，提升了企业的经济效益。

其中，自动化生产线的采用成为关键的发展方向。借助先进的自动化设备与技术，实现了集装箱零部件从加工到组装的全自动化操作^[10]。自动化生产线凭借其高度的精准性和稳定性，不仅能够快速完成大量零部件的生产任务，而且可以保证产品质量始终维持在较高水平，有效避免了人工操作可能带来的误差和质量波动。

与此同时，为适应轻量化材料的特性，制造企业大力开展工艺创新。以复合材料为例，这类材料具有比强度高、可设计性强等优点，但对加工工艺要求也较为苛刻。为此，企业研发出真空袋压成型、树脂传递模塑成型等先进的成型工艺。这些工艺能够精准控制复合材料在成型过程中的温度、压力等参数，确保复合材料零部件具备优异的质量和性能，为集装箱轻量化设计的最终实现提供了不可或缺的技术支撑。

四、结束语

机械工程技术在设计理论、材料工程和制造工艺等多个关键维度持续创新发展，为集装箱轻量化设计构建起一套全方位、多层次的技术支持体系。在设计理论层面，先进理念的引入与多学科协同设计方法的应用，从根源上优化了集装箱的设计思路，提升设计的科学性与合理性。材料工程领域，轻质材料的研发与应用，以及对现有材料性能的提升改进，为轻量化提供了坚实的物质基础。制造工艺的优化和创新，则确保了轻量化设计能够精准落地。

通过这一系列举措，成功实现了集装箱的轻量化设计。这不仅有效降低了运输过程中的能耗，减少了能源成本与环境污染，还显著提高了运输效率，增强了集装箱运输行业的竞争力，推动其朝着可持续方向发展。展望未来，随着机械工程技术持续突破，集装箱轻量化设计将不断拓展边界，迎来更广阔的发展空间，在全球贸易的大舞台上发挥更为关键的作用，有力促进全球贸易的繁荣。

参考文献

- [1] 敖国安. 新型机械设计在汽车工程中的应用 [J]. 汽车测试报告, 2024, (10): 14-16.
- [2] 童晖. 港口装卸机械振华重工完成世界首创 ABC 岸边集装箱起重机方案设计 [J]. 起重运输机械, 2021, (09): 34-35.
- [3] 陈哲, 周琳, 李强. 集装箱载铁矿石智能机械取样设备系统探究 [J]. 质量与认证, 2024, (06): 42-44. DOI: 10.16691/j.cnki.10-1214/t.2024.06.008.
- [4] 唐军, 樊连海, 钱世江, 等. 新型集装箱用木地板外部机械强度损伤（破坏）因素的力学分析与探究 [J]. 林产工业, 2023, 60(08): 43-46. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202308008.
- [5] 庞国斌, 吴婷婷, 黄运. 智慧型机械式冷藏集装箱油电混合电力包设计 [J]. 电工技术, 2023, (14): 112-114. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.14.032.
- [6] 丁飞虎, 张斌, 牛建涛, 等. 自动化集装箱码头变电所机械通风及空调远程控制系统设计 [J]. 水运工程, 2016, (09): 167-170. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2016.09.035.
- [7] 彭宜蕾, 封学军, 顾建, 等. 基于发动机活动的集装箱港作机械排放清单研究 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(03): 1136-1141. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.061.
- [8] 宋海涛, 张连钢, 杨杰敏, 等. 利用堆场机械称重系统提升集装箱码头对外服务的探讨 [J]. 中国水运 (下半月), 2015, 15(14): 35-37.
- [9] 于绍政, 孙冬石, 陈靖, 等. 自动化集装箱码头机械配置仿真优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31(12): 2750-2757. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0335.
- [10] 卓宏明, 侯舟波. 四位一体虚实结合的高职专业教学改革——以港口集装箱机械与输送机机械课程为例 [J]. 物流工程与管理, 2019, 41(01): 148-150.