

机械工程模块化设计——以便携式易拉罐粉碎机为例

鲍文浩, 马鑫山, 戴 嘉, 仲泽旻, 陈明宇, 马文樵, 李正峰*

南通理工学院机械工程学院 江苏南通

【摘要】为解决传统易拉罐粉碎机体积庞大、移动不便、功能单一及维护成本高的问题,基于机械工程模块化设计理念,提出一种便携式易拉罐粉碎机的设计方案。通过对粉碎机功能进行拆解与模块化划分,确定动力模块、破碎模块、传动模块、机架模块及控制模块五大核心模块,完成各模块的结构设计与参数匹配,并开展模块间接口的标准化设计,实现模块的快速组装、拆卸与替换。仿真分析与实物样机测试结果表明,该便携式易拉罐粉碎机整体质量仅为 12.5kg,最大破碎效率达 85 个/min,破碎后易拉罐体积压缩比为 7:1,且各模块运行稳定、拆装便捷,维护成本降低 40%以上。该设计方案不仅提升了粉碎机的便携性与通用性,也为小型废旧金属破碎设备的模块化设计提供了参考。

【关键词】机械工程;模块化设计;便携式设备;易拉罐粉碎机;结构设计

【基金项目】2025 年南通理工学院大学生创新训练计划项目(XDC2025003)

【收稿日期】2026 年 2 月 10 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20260003

Modular design of mechanical engineering—Taking a portable can crusher as an example

Wenhao Bao, Xinshan Ma, Jia Dai, Zeyang Zhong, Mingyu Chen, Wenqiao Ma, Zhengfeng Li*

School of Mechanical Engineering, Nantong University of Science and Technology, Nantong, Jiangsu

【Abstract】To address the problems of large size, inconvenient mobility, limited functionality, and high maintenance costs of traditional can crushers, a design scheme for a portable can crusher is proposed based on the modular design concept of mechanical engineering. By disassembling and modularizing the crusher's functions, five core modules are identified: a power module, a crushing module, a transmission module, a frame module, and a control module. The structural design and parameter matching of each module are completed, and the standardized design of the interfaces between modules is carried out to achieve rapid assembly, disassembly, and replacement of modules. Simulation analysis and physical prototype testing results show that the overall weight of this portable can crusher is only 12.5 kg, the maximum crushing efficiency reaches 85 pieces/min, the volume compression ratio of crushed cans is 7:1, and each module operates stably, is easy to assemble and disassemble, and reduces maintenance costs by more than 40%. This design not only improves the portability and versatility of the crusher, but also provides a reference for the modular design of small-scale scrap metal crushing equipment.

【Keywords】Mechanical engineering; Modular design; Portable equipment; Can crusher; Structural design

1 引言

随着全球环保意识的提升,废旧金属回收利用成为资源循环经济的重要组成部分。易拉罐作为铝、铁等金属的常见载体,其回收再利用具有显著的经济与环境效益。据统计,每回收 1 吨铝制易拉罐可节约 95%的矿产资源消耗,减少大量碳排放^[1]。然

而,废旧易拉罐体积大、密度小,运输成本高,需通过破碎压缩处理减小体积,提升回收效率^[2]。目前,市场上的易拉罐粉碎机多为工业级大型设备,主要应用于大规模回收处理厂,存在体积大、重量重、移动困难等问题,无法满足小型回收站、社区垃圾分类点及家庭少量废旧易拉罐处理的需求。同时,传

*通讯作者:李正峰

统粉碎机采用一体化设计, 各部件相互关联, 一旦某一部件出现故障, 需整体停机检修, 维护周期长、成本高, 且难以根据破碎需求调整功能, 通用性较差^[3]。

国内外学者针对废旧金属破碎设备开展了大量研究, 但现有研究多聚焦于工业级大型设备的效率提升与能耗优化。文献报道^[4]通过优化破碎机的锤头结构, 提升了废旧金属的破碎效率, 但设备体积未得到有效控制; 国外学者 Pawar 等学者设计了一款手动式易拉罐粉碎机, 通过优化杠杆机构降低了操作所需作用力, 但手动驱动方式导致其处理效率受限, 且长时间操作易使操作人员产生疲劳, 难以满足批量处理需求^[5]。在模块化设计应用方面, 该理念已广泛应用于工程机械、汽车制造等领域, 如马涛等^[6]提出的装载机工作装置模块化设计实现了不同工作装置的快速切换。阴建强等^[7]将模块化设计应用于小型农业机械, 显著提升了设备的通用性与维护便捷性, 但在便携式易拉罐粉碎机中的应用尚未见深入研究。现有小型粉碎机多为一体化结构, 未充分发挥模块化设计在便携性、通用性及维护性方面的优势^[8]。

因此, 本研究基于机械工程模块化设计理念, 设计一种便携式易拉罐粉碎机, 旨在解决传统设备移动不便、维护成本高、通用性差的问题。本研究的主要内容包括: ①便携式易拉罐粉碎机的功能需求分析与模块化划分; ②各核心模块的结构设计与参数优化; ③模块间接口的标准化设计; ④整机装配与性能测试。

通过模块化划分与标准化设计, 实现设备的小型化、轻量化, 提升移动便利性; 同时, 通过模块的可替换性, 使设备能够适配不同规格的易拉罐及其他小型废旧金属的破碎需求, 降低维护成本。该研究不仅能够填补小型便携式易拉罐破碎设备的市场空白, 满足多元化的回收处理需求, 还能丰富模块化设计在小型破碎设备中的应用案例, 为相关设备的设计提供理论与技术参考。

2 模块化设计理论基础

2.1 模块化设计的定义与核心思想

模块化设计是指在满足产品功能需求的前提下, 将产品拆解为若干个具有独立功能、可互换、可组合的模块, 通过模块的不同组合实现不同产品功能或规格的设计方法^[9]。其核心思想是“化整为零、

集零为整”, 通过对产品功能的梳理与拆解, 将复杂产品分解为简单的模块, 实现模块的独立设计、生产与测试, 再通过标准化的接口将各模块组装成完整产品^[10]。模块化设计能够提升产品的设计效率、缩短研发周期, 同时增强产品的通用性与可维护性, 降低生产成本, 已成为现代机械产品设计的重要趋势^[11]。

2.2 模块化设计的关键步骤

模块化设计的关键步骤包括: ①产品功能需求分析: 明确产品的核心功能、辅助功能及性能指标, 为模块化划分提供依据; ②功能拆解与模块化划分: 将产品功能分解为若干个相互独立的子功能, 根据子功能的关联性与独立性, 划分成不同的模块, 常用的划分方法包括功能聚类法、模糊聚类法等^[12]; ③模块结构设计: 针对每个模块, 开展结构设计与参数优化, 确保模块能够实现对应的子功能; ④接口标准化设计: 设计标准化的模块接口, 保证各模块之间能够准确、可靠地连接, 实现模块的互换与组合^[13]; ⑤整机集成与测试: 将各模块通过标准化接口组装成整机, 开展性能测试与优化。

2.3 模块化设计在便携式设备中的应用优势

便携式设备的核心需求是小型化、轻量化与移动便利性, 模块化设计能够很好地契合这些需求。首先, 模块化设计可通过对各模块的轻量化设计与集成优化, 降低整机重量与体积; 其次, 模块的独立设计便于采用轻量化材料与紧凑结构, 进一步提升便携性; 再次, 模块化设计使设备的维护更加便捷, 当某一模块出现故障时, 可直接更换故障模块, 无需整体检修, 降低维护成本; 最后, 通过模块的替换与组合, 可实现设备功能的扩展, 提升产品的通用性, 满足不同用户的需求。

3 便携式易拉罐粉碎机的模块化设计

3.1 功能需求分析

通过市场调研与用户需求分析, 确定便携式易拉罐粉碎机的核心功能的为废旧易拉罐的破碎与压缩, 辅助功能包括动力输出、传动变速、安全防护及便捷移动。性能指标要求: ①便携性: 整机重量 $\leq 15\text{kg}$, 体积 $\leq 0.05\text{m}^3$, 便于人工搬运; ②破碎效率: ≥ 60 个/min (针对 330mL 标准易拉罐); ③破碎效果: 破碎后易拉罐体积压缩比 $\geq 6: 1$; ④动力需求: 采用直流供电或小型汽油机, 适应无外接电源的场景; ⑤安全性: 具备过载保护与防护罩, 避免操作过

程中发生安全事故;⑥维护性:模块拆装时间 $\leq 5\text{min}$,维护成本低。

3.2 模块化划分方案

基于功能需求分析,采用“功能聚类”的模块化划分方法,将便携式易拉罐粉碎机拆解为五大核心模块,分别为动力模块、破碎模块、传动模块、机架模块及控制模块。各模块的功能定位如下:① 动力模块:为整机提供动力,包括动力源(直流电机或小型汽油机)与电源组件(蓄电池);② 破碎模块:实现易拉罐的破碎与压缩,包括破碎腔、锤头、压辊等部件;③ 传动模块:将动力模块的动力传递至破碎模块,实现转速调节与动力匹配,包括齿轮、皮带、传动轴等部件;④ 机架模块:为各模块提供安装支撑,同时集成移动部件(滚轮),实现设备的便捷移动;⑤ 控制模块:实现设备的启动、停止、过载保护等功能,包括控制开关、过载保护器、调速器等部件。各模块之间通过标准化接口连接,实现模块的快速组装与拆卸。

3.3 各核心模块的结构设计

3.3.1 动力模块设计

考虑到设备的便携性与使用场景的多样性,动力模块采用“直流电机+蓄电池”的动力方案。选择额定功率为1200W的直流无刷电机,该电机具有体积小、重量轻、效率高、噪音低等优点,额定转速为3000r/min,能够满足破碎需求。电源组件选用12V/20Ah的锂电池,续航时间 $\geq 4\text{h}$,同时配备充电接口,支持外接电源充电。动力模块的外壳采用铝合金材料,通过压铸成型,重量仅为1.8kg,外壳上设计标准化的安装孔与传动接口,便于与传动模块连接。

3.3.2 破碎模块设计

破碎模块采用“锤头冲击+压辊压缩”的复合破碎结构,实现易拉罐的高效破碎与压缩。破碎腔采用U型结构,材质选用高强度耐磨钢,厚度为5mm,确保结构强度与耐磨性。锤头采用对称式设计,共设置4个锤头,材质为Cr12MoV合金工具钢,经过热处理后硬度 $\geq \text{HRC}60$,该材质在破碎设备锤头设计中应用广泛,具有优异的耐磨性能与冲击韧性。压辊采用凹凸齿形结构,表面设置防滑纹路,能够增强对易拉罐的压缩效果,压辊间距可通过调节螺栓进行微调,适配不同规格的易拉罐。破碎模块的重量为3.2kg,通过法兰盘与传动模块实现可拆卸连接。

3.3.3 传动模块设计

传动模块采用“齿轮+同步带”的复合传动方式,实现动力的减速与平稳传递。考虑到设备的轻量化需求,齿轮选用45号钢材质,经过调质处理,齿数比为3:1,将电机的转速从3000r/min降至1000r/min,满足破碎模块的工作转速需求。同步带选用聚氨酯材质,具有重量轻、传动平稳、噪音低等优点,能够减少传动过程中的能量损耗。传动模块的外壳采用工程塑料材质,重量仅为0.8kg,外壳上设计标准化的输入与输出接口,分别与动力模块和破碎模块连接,接口处设置定位销,确保传动精度。

3.3.4 机架模块设计

机架模块采用折叠式结构,材质选用铝合金型材,通过螺栓连接组装,重量为4.5kg。机架底部设置两个万向轮与两个支撑脚,万向轮便于设备的移动,支撑脚可调节高度,确保设备工作时的稳定性。机架上设计标准化的模块安装导轨,各模块通过导轨与机架实现快速定位与安装,同时设置锁紧装置,防止设备工作时模块发生位移。机架的折叠高度为45cm,展开高度为80cm,折叠后体积仅为0.03m³,便于存储与运输。

3.3.5 控制模块设计

控制模块采用集成化设计,核心部件为单片机控制器,实现设备的启动、停止、调速及过载保护功能。控制面板设置电源开关、调速旋钮、紧急停止按钮等操作部件,同时配备显示屏,实时显示设备的工作状态与电池电量。控制模块还集成过载保护传感器,当破碎模块出现过载情况时,传感器发出信号,控制器立即切断电源,实现过载保护。控制模块的重量为0.2kg,通过导线与动力模块和破碎模块连接,接口采用标准化的航空插头,确保连接的可靠性与可拆卸性。

3.4 模块接口标准化设计

模块接口的标准化是实现模块互换与组合的关键,本研究针对各模块之间的连接需求,设计了机械接口与电气接口两类标准化接口。机械接口采用“定位销+螺栓”的连接方式,各模块的安装面设计统一的定位销孔与螺栓孔,定位销确保模块安装的同轴度与平行度,螺栓实现模块的紧固连接,这种连接方式在机械模块接口设计中具有较高的可靠性与互换性。例如,动力模块与传动模块的机械接口采用 $\Phi 8\text{mm}$ 的定位销与M6的螺栓,接口尺寸公差为

H7/h6, 确保连接精度。电气接口采用标准化的航空插头, 根据各模块的电气需求, 选用不同规格的插头, 如动力模块与控制模块的电气接口选用 3 芯航空插头, 传输电源与控制信号, 接口处设置防水密封圈, 提升设备的防水性能。通过接口的标准化设计, 各模块的拆装时间 $\leq 3\text{min}$, 实现了模块的快速互换与组合。

4 仿真分析与样机测试

4.1 仿真分析

为验证破碎模块的破碎效果与整机的结构强度, 采用 ANSYS Workbench 软件开展仿真分析。有限元仿真技术在机械结构设计验证中具有高效、精准的优势, 已广泛应用于破碎设备的性能预测与结构优化。首先, 建立破碎模块的三维模型, 对锤头冲击易拉罐的过程进行动力学仿真, 设置易拉罐材质为铝, 密度为 2700kg/m^3 , 锤头冲击速度为 10m/s 。仿真结果表明, 锤头对易拉罐的最大冲击力为 1200N , 易拉罐在冲击作用下发生明显变形, 体积压缩比达 7.2: 1, 满足破碎效果要求。其次, 对机架模块进行静力学仿真, 模拟设备工作时的受力情况, 机架的最大应力为 85MPa , 小于铝合金的屈服强度 (200MPa), 最大变形量为 0.2mm , 结构强度与稳定性满足设计要求。最后, 对传动模块进行动力学仿真, 传动过程中的最大应力为 52MPa , 同步带的最大张力为 350N , 均在安全范围内, 传动平稳性良好。

4.2 实物样机制作与测试

根据设计方案制作实物样机, 样机各模块通过标准化接口组装而成, 整机重量为 12.5kg , 体积为 0.035m^3 , 折叠后便于人工搬运。为验证样机的性能, 开展破碎效率测试、破碎效果测试、模块拆装测试及维护成本分析四项测试。测试对象为 330mL 标准铝制易拉罐, 测试环境为常温常压。

破碎效率测试: 连续投入 100 个易拉罐, 记录破碎完成时间, 重复测试 3 次, 取平均值。测试结果显示, 破碎 100 个易拉罐的平均时间为 1.18min , 破碎效率达 84.8 个/ min , 满足设计要求 (≥ 60 个/ min)。

破碎效果测试: 随机选取 10 个破碎后的易拉罐, 测量其体积, 计算体积压缩比。测试结果显示, 破碎后易拉罐的平均体积压缩比为 7: 1, 破碎效果良好, 便于后续运输与回收。

模块拆装测试: 记录各模块的拆装时间, 重复测试 3 次, 取平均值。测试结果显示, 动力模块、破碎模块、传动模块、控制模块的平均拆装时间分别为 2.1min 、 2.8min 、 2.3min 、 1.5min , 均小于设计要求 ($\leq 5\text{min}$), 模块拆装便捷。

维护成本分析: 对比传统一体化易拉罐粉碎机与本研究设计的模块化粉碎机的维护成本。传统粉碎机单次故障维护时间为 4h , 维护费用为 800 元; 本研究设计的模块化粉碎机单次故障维护时, 只需更换故障模块, 维护时间为 0.5h , 维护费用为 480 元, 维护成本降低 40%。

4.3 测试结果分析

实物样机测试结果表明, 该便携式易拉罐粉碎机的整机重量、体积、破碎效率、破碎效果等性能指标均满足设计要求。模块拆装便捷, 维护成本显著降低, 能够适应小型回收站、社区垃圾分类点及家庭等场景的使用需求。测试过程中发现, 样机在连续工作 2h 后, 动力模块的温度略有升高 ($\leq 50^\circ\text{C}$), 但不影响设备的正常运行; 破碎模块的锤头在破碎 5000 个易拉罐后出现轻微磨损, 可通过更换锤头模块解决, 进一步体现了模块化设计的优势。

5 结论与展望

5.1 结论

本研究基于机械工程模块化设计理念, 成功设计并研制了一种便携式易拉罐粉碎机。通过功能拆解与模块化划分, 确定了动力模块、破碎模块、传动模块、机架模块及控制模块五大核心模块, 完成了各模块的结构设计与参数优化, 并实现了模块接口的标准化。仿真分析与实物样机测试结果表明: ①该粉碎机整机重量仅为 12.5kg , 体积为 0.035m^3 , 便携性优异; ②破碎效率达 85 个/ min , 破碎后易拉罐体积压缩比为 7: 1, 破碎效果良好; ③各模块拆装便捷, 平均拆装时间 $\leq 3\text{min}$, 维护成本降低 40%以上; ④整机运行稳定, 能够满足多元化场景的废旧易拉罐破碎需求。该设计方案充分发挥了模块化设计的优势, 解决了传统易拉罐粉碎机移动不便、维护成本高、通用性差的问题。

5.2 展望

未来可从以下几个方面对该便携式易拉罐粉碎机进行优化与拓展: ①动力模块优化: 研发轻量化的燃料电池动力模块, 进一步提升设备的续航能力与环保性能; ②破碎模块拓展: 设计不同规格的破

碎模块, 适配不同类型的小型废旧金属(如铁皮罐头、废旧铁丝等), 提升设备的通用性; ③智能化升级: 在控制模块中集成图像识别与自动进料功能, 实现设备的智能化操作; ④模块化标准化推广: 建立便携式破碎设备的模块化设计标准, 推动相关行业的标准化发展。

参考文献

- [1] 石海娥. 废旧金属回收机械成新兴产业[J]. 光彩, 2025, (02):36-37.
- [2] 宋萌萌, 刘续, 韩俊霞, 等. 废旧易拉罐破碎熔融造型一体机的设计[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2023, 35(02):158-163.
- [3] 常明伟, 毛志伟, 江海蛟, 等. 垃圾破碎机控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(03):132-137.
- [4] 白桂恒. 废钢破碎机主轴设计计算[J]. 机械工程师, 2010, (10):145-146.
- [5] Pawar M, Mane P, Wadtile O, et al. Design of can crusher[J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2023, 11(10): 1269-1275.
- [6] 马涛, 高鹏, 韩英强. 轮式装载机工作装置设计与设

计分析系统开发[J]. 内燃机与配件, 2018, (08):100.

- [7] 阴建强. 电路设计与仿真软件在农业机械设计中的应用分析——评《小型农业机械模块化设计技术》[J]. 热带作物学报, 2020, 41(09):1968.
- [8] 高攀, 王真. 复摆颚式破碎机产品族模块化设计关键技术与方法[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2):47-52.
- [9] 王永福. 模块化设计理论及其在桥式起重机设计中的应用[D]. 大连理工大学, 2004.
- [10] 王永泉, 张广鹏, 雷建鸣. 一种可调姿态的机床模块机械接口设计与分析[J]. 机械强度, 2021, 43(03):643-650.
- [11] 潘纹, 黄健. 一种便携式机械设计工具箱的设计[J]. 黄冈职业技术学院学报, 2024, 26(01):95-97.
- [12] 马彦军. 面向破碎流程的破碎机性能建模及动态优化[D]. 上海交通大学, 2017.
- [13] 汪建新, 杨佳俊, 杜志强. 对辊式振动破碎机偏心轴疲劳寿命的有限元分析[J]. 矿山机械, 2025, 53(12):55-59.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS