

多工艺协同的废钢加工装备柔性化集成方法研究

齐菊香

江苏济昇再生资源利用有限公司, 江苏 盐城

收稿日期: 2025年10月21日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月17日

摘要

随着钢铁工业向绿色化、高质量方向转型, 废钢加工正呈现出多品类、精细化与用途适配型的发展趋势, 传统加工模式因其路径刚性与设备配置单一已难以满足高端钢厂对废钢纯净度、一致性和适配性的需求。本文聚焦废钢加工系统中多工艺协同与装备柔性配置问题, 提出一种面向物料差异、工艺路径与装备能力耦合的柔性化集成方法。研究构建了模块化加工系统架构, 设计了工艺路径智能匹配模型与加工流程动态调控机制, 并在典型企业场景中进行了实践验证。结果表明, 该体系在路径切换效率、加工纯净度、设备利用率与产能扩展方面具有显著优势, 有效支撑了从“资源回收”向“可控原料”转变的行业升级需求。研究不仅填补了废钢加工系统柔性集成层面的理论空白, 也为行业实现标准化、智能化与绿色化提供了方法路径与工程样本。

关键词

废钢加工, 柔性装备集成, 多工艺协同, 加工路径优化

Research on Flexible Integration Methods of Scrap Steel Processing Equipment under Multi-Process Synergy

Juxiang Qi

Jiangsu Jisheng Renewable Resources Utilization Co., Ltd., Yancheng Jiangsu

Received: October 21, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 17, 2025

Abstract

With the transformation of iron and steel industry to green and high quality, scrap processing is

文章引用: 齐菊香. 多工艺协同的废钢加工装备柔性化集成方法研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(4): 208-212.

DOI: 10.12677/meng.2025.124026

showing the development trend of multi-category, refinement and adaptability. The traditional processing mode has been difficult to meet the needs of high-end steel mills for purity, consistency and adaptability of scrap because of its rigid path and single equipment configuration. Focusing on the problem of multi-process coordination and flexible configuration of equipment in scrap processing system, this paper puts forward a flexible integration method for material difference and coupling of process path and equipment capacity. The modular machining system architecture is studied and constructed, and the intelligent matching model of process path and the dynamic control mechanism of machining process are designed, which are verified by practice in typical enterprise scenarios. The results show that the system has obvious advantages in path switching efficiency, processing purity, equipment utilization rate and capacity expansion, and effectively supports the industry upgrading demand from “resource recovery” to “controllable raw materials”. The research not only fills the theoretical blank of flexible integration of scrap processing system, but also provides a method path and engineering samples for the industry to achieve standardization, intelligence and greening.

Keywords

Scrap Steel Processing, Flexible Equipment Integration, Multi-Process Coordination, Processing Path Optimization

Copyright © 2025 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

在“双碳”战略驱动与资源循环体系持续完善的背景下，废钢作为钢铁工业中减碳潜力最大的原料之一，其加工利用能力正成为衡量冶金行业高质量发展的关键指标。近年来，我国钢铁产业加速向短流程炼钢模式转型，头部钢厂对废钢的分类精度、纯净度和成分稳定性提出了更高要求，废钢加工逐步由粗放式回收向“多品类、用途导向、精细化处理”演进。然而，目前多数加工企业仍依赖单一工艺与固定路径，装备配置缺乏弹性，难以适应废钢在尺寸、形态与杂质结构等方面的多样性。同时，加工链条存在协同弱、流程僵化等问题，已难以满足钢厂对废钢稳定性、可控性和适配性的需求。面对大规模、多样化废钢流转的现实挑战，传统加工体系在产能利用率、成材率和能源效率等方面普遍存在技术瓶颈。

为应对上述问题，本文提出构建具备高度柔性或多工艺协同能力的废钢加工装备集成体系，从系统层级出发，突破传统路径配置与设备协同的结构性限制。研究聚焦于品类识别、终端适配与工艺路径灵活切换，探索支持剪切、压块、破碎、分选等关键单元模块化组合与动态部署的方法体系，构建满足多样化钢厂质量要求的柔性加工链条。在此基础上，研究从系统架构设计、工艺协同机制、装备组合优化与实践验证等方面展开，旨在解决响应滞后、设备通用性差与出料一致性低等问题，推动废钢由“资源回收”向“可控原料”转变。本文在方法构建与模型应用上填补了加工系统集成领域的研究空白，并为我国废钢行业迈向标准化、智能化、绿色化发展提供了理论支持与实践路径。

2. 文献综述与研究空白

废钢加工技术的发展与钢铁产业结构调整密切相关，特别是在我国推进短流程炼钢的背景下，加工装备的能力与协同水平日益成为影响资源利用效率的关键因素。当前研究多聚焦于剪切、压块、破碎与分选等设备的功能提升与工艺效率优化，例如液压剪切设备在重废处理、破碎系统在轻薄料分离中的应

用已取得良好成效。同时，在流程层面，图像识别、磁选等技术被用于物料的初步分选与预处理，但多数成果仍集中于工艺单元级改进，缺乏对全流程装备协同机制的系统建构，难以应对废钢种类多样、结构复杂背景下对成分稳定性和适配性的更高要求。

柔性制造系统作为应对多品种、小批量需求的有效方式，已广泛应用于装备制造、电子装配等领域，并逐步被引入资源再利用与再制造场景，其核心在于通过模块化配置与动态调度提升系统应变能力。尽管已有研究在电子废弃物处理中构建了柔性模块结构，废钢加工领域的实践仍较有限。目前部分企业尝试采用并行加工线应对物料差异，但普遍依赖经验决策，缺乏模型驱动的路径重构与系统调度机制，未能形成稳定有效的柔性配置理论体系[1]。总体而言，当前关于废钢加工系统的研究在装备协同、路径规划及系统建模方面仍存在空白，尚未建立面向“物料特征-工艺路径-装备组合”的柔性系统方法。为此，本文从加工系统集成的视角出发，提出一套多工艺协同下的柔性装备配置方法，构建融合路径规划、模块组合与系统调控的系统解决方案，旨在补齐该领域理论与方法的缺位，并为行业实现智能化、标准化升级提供示范路径。

3. 废钢多样性需求与加工体系分析

随着钢铁工业迈向高性能、高品质方向发展，高端钢厂，尤其是采用短流程电炉工艺的企业，对废钢原料的适配性提出了更精细化与系统化的要求。沙钢、鞍钢、淮钢等代表性企业已建立起覆盖重废、小废、压块料、刨花料等数十种细分类体系，并为各类物料制定了详细的技术标准，如尺寸、重量、杂质、含油率、磁性等，部分甚至细化至交货批次一致性。这一标准体系不仅要求加工企业具备精准识别物料属性的能力，更需根据冶炼工艺快速调整加工路径，确保供料洁净、稳定且具备良好工艺兼容性。同时，不同钢厂因炼钢方式、产品结构及质量策略不同，对废钢的物理与化学性能存在差异化需求，倒逼加工企业从统一供料向面向终端需求的多路径、柔性化体系转型，以实现高效协同和精准适配。

然而，面对日益多样化的需求，多数废钢加工企业仍沿用“统废收集-粗分类-固定路径-混合出料”的传统模式，虽具一定处理效率与成本优势，却难以满足精准供料的要求。当前工艺配置多为静态、设备组合固定，难以灵活响应物料差异；工艺单元协同不足，信息滞后、控制粗放，难以动态调节加工过程，影响出料稳定性和成材率；分类识别依赖人工，缺乏高精度技术支撑；且不少企业尚未建立完善的质量追溯机制，难以满足高端钢厂对原料一致性的严苛要求。要构建与高端钢厂深度匹配的柔性加工体系，不仅需突破单点技术瓶颈，更要在系统层面完成整体重构。这包括具备高效识别与动态分级能力的系统设计，解决工艺模块接口不统一与参数耦合问题，发展成熟的模块化集成与协同控制机制，并在能效、稳定性与调度能力方面实现最优平衡[2]。在管理层面，还需依托信息系统，实现工艺逻辑、设备状态与订单需求的实时联动，形成闭环式响应机制。综上，柔性协同体系的建设是集技术、系统与管理多维协同的复杂工程，亟需在理论、架构与实践上实现系统性突破。

4. 柔性化集成系统构建与多工艺协同方法

废钢加工的柔性化转型首先依赖系统架构的重构，其目标是突破传统线性加工路径的适应性瓶颈，构建具备可扩展性、可重构性与高适配性的模块化平台[3]。在架构设计上，应遵循“工艺模块化、设备组合灵活化、路径结构网络化”的基本原则，打破剪切、压块、破碎、分选等工艺间的刚性连接，形成多入口、多路径、多出口的开放式结构。系统主要包括三层：一是装备执行层，涵盖液压剪、破碎机、磁选设备、打包机等关键设备，承担具体加工任务；二是工艺配置层，负责将加工需求映射为最优设备组合和工艺顺序，构建标准化路径库；三是调度控制层，通过信息系统进行设备监控与任务反馈，确保各模块协同运行。该架构显著提升了系统对废钢物料多样性与加工复杂性的响应能力，支撑路径灵活部署与

任务动态调整。

实现多工艺协同的关键在于构建物料属性、工艺需求与装备能力之间的映射机制，确保路径组合与调度逻辑一致。协同机制首先基于物料特征建模，包括尺寸、结构、杂质、磁性等属性，结合钢厂标准形成工艺需求向量。在此基础上，构建以工艺过程图为核心的路径匹配模型，将剪切、压块、破碎、分选等环节作为可调节点，利用属性驱动算法动态生成最优路径，兼顾设备可用性、产能负荷与物料相似性等约束，实现效率与质量的平衡。为提升协同效率，系统还需通过接口标准化对各环节输出进行边界控制，保障工艺之间的物理衔接与参数兼容，构建真正意义上的全流程柔性协同体系。

加工系统的高效稳定运行依赖于清晰的流程逻辑与科学的调控机制。系统应形成“源头识别 - 路径选配 - 设备调度 - 质量反馈”的闭环控制流程，通过智能识别模块完成物料分级定类，调用路径库匹配加工方案，并根据设备状态动态派发任务。在调控层面，构建“实时监测 - 动态调整 - 数据反馈”一体化管理机制：通过传感器与边缘计算采集剪切压力、压块密度、粒径、纯净度等关键参数；利用规则与数据驱动算法对负载波动、瓶颈节点等进行调整与优化；并通过建立质量与路径配置的关联数据库实现自学习与路径迭代。该机制不仅保障了加工过程的精细控制与稳定运行，也为系统智能化演进提供了数据基础与结构支撑。

5. 柔性装备配置策略与系统应用实践

实现废钢加工柔性化的关键，在于对装备系统功能的重构与协同配置，建立支持多工艺路径的模块化装备体系。当前主流设备如剪切、压块、破碎与分选各自承担特定工艺任务，但在传统系统中常以线性、静态方式组合，缺乏针对不同废钢类型与终端需求的灵活调度能力。为此，本文提出“功能解耦 - 路径组合 - 信息协同”的配置逻辑，将各加工单元模块化处理，构建可重构的工艺拓扑网络，实现接口统一、节奏匹配与数据共享。通过信息集成节点，系统能将工艺参数与设备状态实时反馈至调度平台，在任务驱动下实现动态路径组合与协同执行，显著提升系统应对多品类、复杂任务的能力^[4]。同时，加工方案设计不再依赖静态预设，而是基于物料属性、设备能力与目标要求动态生成，借助物料分类与路径映射模型，结合设备实时状态与系统负荷条件，筛选并部署最优加工路径，形成“识别 - 匹配 - 执行 - 反馈”的柔性循环体系。

在工程化应用方面，本文提出的多工艺协同与柔性装备集成方法已在废钢加工企业中完成示范部署。该企业原系统受制于设备匹配度低与工艺切换滞后，生产效率和产品稳定性长期受限。新体系建设过程中，企业采用“设备租赁 + 绿色信贷”组合模式，有效降低资金成本 12%，并完成 1250 吨龙门剪、1500 吨打包机及 AI 智能破碎分选线的集成配置。依托实时监控与跨工序调度平台，形成了设备层、工艺层与信息层的协同运行机制，显著增强了系统的响应速度与负载灵活性。运行数据显示，生产线的年加工能力提升 2 倍，废钢纯净度提高至 98.5%，远超行业平均水平，且在设备利用率与能耗控制方面均表现优异。项目在短期内实现盈亏平衡，年度创收超过 3 亿元，占公司营收比重由 15%增至 40%，并入选《中国再生金属行业年度创新案例集》，成为废钢加工装备柔性化集成的标杆工程，验证了本文方法在复杂工业场景中的可行性与推广潜力。

6. 研究结论与展望

本研究聚焦废钢加工行业面向高端化、差异化与定制化供料的趋势，提出一种支持多工艺协同的柔性加工装备集成方法，并构建了具备动态路径选择与模块化装备组合能力的系统架构。研究首先剖析了高端钢厂在废钢品类、纯净度与适配性方面的精细化需求，指出传统加工模式在路径刚性、设备协同与响应能力上的结构性限制。基于“工艺 - 装备 - 物料”的三维联动逻辑，构建柔性系统架构与路径匹配

机制,明确工艺模块间的协同运行逻辑与调控方式。在此基础上,设计多种柔性加工方案,支持对不同废钢品类的快速识别与适配处理[5]。通过企业级案例验证,该体系在产能利用率、加工一致性、纯净度与路径切换效率等方面均表现出显著优势,显示出良好的工程适应性与推广价值。

本研究不仅填补了废钢加工系统在“柔性集成方法”方面的理论空白,还为装备配置、工艺路径协同与智能调度控制等关键问题提供了系统性解决方案,推动废钢加工由单一工艺优化向系统协同演化,具有重要的理论贡献与现实意义。尽管本文已完成系统架构设计与初步工业验证,但在路径决策智能化、数据反馈机制及装备间信息互操作等方面仍有提升空间。未来可引入机器学习算法与自适应控制模型,实现加工路径的在线优化与智能进化;同时探索与钢厂冶炼端的联动机制,构建废钢全生命周期质量追踪与闭环管理体系,进一步拓展系统的智能化与绿色化边界。

参考文献

- [1] 张学文,杜天翔,尹西明. 工业互联网平台赋能新质生产力的理论逻辑与实现路径:以河钢集团为例[J]. 技术经济, 2024, 43(11): 14-31.
- [2] 黄庆学. 高品质钢铁板带轧制关键装备与技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 34-63.
- [3] 李新创,高升. 钢铁工业绿色发展途径探讨[J]. 工程研究:跨学科视野中的工程, 2017, 9(1): 19-27.
- [4] 董新峰,仇中柱,韩清鹏. 机械制造技术基础课程中大型零件的群机加工模式探索[J]. 教育进展, 2019, 9(3): 334-342.
- [5] 李金华. 中国绿色制造,智能制造发展现状与未来路径[J]. 经济与管理研究, 2022, 43(6): 3-12.