

分级破碎设备保护系统与装置的研究应用

吴彪¹, 刘振², 赵国亮¹, 黄身水¹, 龙福强¹, 李新月²

1. 镇宁县红蝶实业有限责任公司, 贵州 安顺 561000

2. 泰伯克(天津)机械设备有限公司, 天津 301712

DOI:10.61369/ERA.2025120021

摘要 : 分级破碎设备在矿山、建筑、冶金等行业的物料处理中占据核心地位, 其运行稳定性直接决定生产效率与作业安全。然而, 设备在服役过程中常面临过载、异物卡阻、部件磨损、温度异常等多重风险, 易引发设备损坏、生产中断甚至安全事故。保护系统与装置作为规避上述风险的关键手段, 通过实时监测、智能预警与主动干预, 实现设备全生命周期的安全防护。本文系统梳理分级破碎设备保护系统与装置的发展现状, 深入研究过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警等核心技术的原理与优化路径, 结合多行业应用案例分析不同保护方案的适用性与实施效果, 剖析当前技术存在的响应滞后、适配性不足等问题, 并展望智能化、集成化、精准化的发展趋势, 为保护系统的技术创新与工程应用提供参考。

关键词 : 分级破碎设备; 保护系统; 过载保护; 异物检测; 智能监测

Research and Application of Protection Systems and Devices for Hierarchical Crushing Equipment

Wu Biao¹, Liu Zhen², Zhao Guoliang¹, Huang Shenshui¹, Long Fuqiang¹, Li Xinyue²

1. Zhenning County Hongdie Industrial Co., Ltd., Anshun, Guizhou 561000

2. Taiboke (Tianjin) Machinery & Equipment Co., Ltd., Tianjin 301712

Abstract : Hierarchical crushing equipment plays a central role in material processing across industries such as mining, construction, and metallurgy, with its operational stability directly determining production efficiency and operational safety. However, during service, the equipment often faces multiple risks, including overload, foreign object blockage, component wear, and abnormal temperature, which can lead to equipment damage, production interruptions, and even safety incidents. Protection systems and devices serve as critical means to mitigate these risks, achieving full-lifecycle safety protection for the equipment through real-time monitoring, intelligent early warning, and proactive intervention. This paper systematically reviews the development status of protection systems and devices for hierarchical crushing equipment, delves into the principles and optimization paths of core technologies such as overload protection, foreign object detection and removal, wear-resistant protection, and intelligent monitoring and early warning. Combining application cases across multiple industries, it analyzes the applicability and implementation effects of different protection solutions, examines issues such as response lag and inadequate adaptability in current technologies, and looks ahead to trends toward intelligence, integration, and precision, providing references for technological innovation and engineering applications of protection systems.

Keywords : hierarchical crushing equipment; protection system; overload protection; foreign object detection; intelligent monitoring

引言

在矿产开采、建筑固废资源化等规模化生产场景中, 分级破碎设备需连续处理高硬度、高复杂度的物料, 日均运行时长常超过 16 小时。恶劣的工况环境使设备面临多重安全隐患: 大块异物(如钢筋、废钢)进入破碎腔易造成齿辊卡阻, 瞬间过载导致电机烧毁或传动部件断裂; 物料持续冲击与摩擦使破碎齿、衬板等部件快速磨损, 未及时更换易引发设备振动加剧; 轴承、电机等关键部件因长期负载运行出现温度异常, 若未及时干预将导致不可逆损坏。据行业统计, 未配备完善保护系统的分级破碎设备, 年均故障停机时间达 200

小时以上，维护成本占设备总投入的 35%，且因设备故障引发的安全事故发生率较配备保护系统的设备高出 4 倍。

保护系统与装置通过“监测 – 判断 – 干预”的闭环控制逻辑，实现对设备运行状态的实时管控，是保障设备安全、高效运行的核心支撑。随着智能制造技术的发展，保护系统已从早期的单一机械防护，逐步升级为融合机械、电子、传感与智能算法的综合防护体系^[1-3]。本文通过研究分级破碎设备保护系统与装置的技术特性、优化方法及应用效果，为行业内设备防护方案的设计与升级提供理论与实践依据。

一、分级破碎设备保护系统与装置发展现状

当前，分级破碎设备保护系统与装置根据防护功能可分为过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警四大类，不同类型技术在原理、结构与适用场景上存在显著差异，共同构成设备的多层防护体系^[4-5]。

(一) 过载保护系统与装置

过载保护是应对设备负载突变的首要防线，核心功能是在负载超过安全阈值时快速切断动力传递或降低负载，避免关键部件损坏。目前主流技术包括机型与电控型两类。

机型过载保护装置以液力耦合器、摩擦离合器为代表。液力耦合器通过液体介质传递动力，当负载过载时，泵轮与涡轮间产生滑差，切断扭矩传递，其结构简单、成本低，但响应时间较长（通常大于 0.5 秒），且仅能实现被动保护，无法提前预警。摩擦离合器通过摩擦片间的摩擦力传递扭矩，过载时摩擦片打滑，但其易因摩擦发热导致磨损，需定期更换部件，维护成本较高。

电控型过载保护系统基于传感器监测与智能控制实现防护，通过电流传感器监测电机电流、扭矩传感器检测传动系统扭矩，当参数超过阈值时，控制器立即发出指令切断电机电源或控制喂料装置停止供料。该类型响应速度快（小于 0.1 秒），但受传感器精度与环境干扰影响较大，在粉尘、振动剧烈的工况下易出现误判或漏判。

(二) 异物检测与清除系统

异物卡阻是导致分级破碎设备停机的主要原因之一，异物检测与清除系统通过识别进入破碎腔的有害异物并采取清除措施，降低设备卡阻风险。现有技术可分为预处理检测与腔内检测两类。

预处理检测装置多设置于设备进料口前端，包括格栅式筛分机、金属探测器等。格栅式筛分机通过预设孔径的格栅拦截大块异物，但易因物料堵塞影响进料效率；金属探测器利用电磁感应原理识别金属异物，可联动翻板阀将异物排出，但对非金属硬质异物（如混凝土块、石块）识别能力不足。

腔内异物检测系统采用超声波传感器、红外传感器或机器视觉技术，实时监测破碎腔内物料状态。超声波传感器通过回声信号判断是否存在异物卡阻，但受物料堆积形态影响较大；机器视觉技术通过摄像头采集腔内图像，经算法识别异物，识别精度可达 90% 以上，但需定期清理镜头粉尘，维护难度较高。清除装置则多采用液压驱动的拨料机构或反转机构，当检测到异物时，拨料机构将异物拨至排料口，或控制齿辊反转排出异物，但反转过

程易造成物料二次堆积。

(三) 耐磨防护装置

破碎齿、衬板等易损部件的磨损速率直接影响设备使用寿命，耐磨防护装置通过材料强化与结构优化，降低磨损损耗。目前应用较广的包括表面强化装置与结构防护装置。

表面强化装置主要通过堆焊、喷涂等技术提升部件表面耐磨性。堆焊装置将高硬度合金材料堆焊于破碎齿表面，形成耐磨损层，但其堆焊层与基体结合强度受工艺影响较大，易出现剥落；热喷涂装置通过等离子喷涂技术在衬板表面形成陶瓷涂层，硬度可达 HV1000 以上，但涂层厚度均匀性难以控制，局部磨损后需整体更换。

结构防护装置采用可更换式耐磨组件设计，如将破碎齿设计为模块化结构，磨损后仅更换齿头即可，无需更换整个齿体；在衬板表面设置仿生凸台结构，减少物料与衬板的直接摩擦，但其结构设计需匹配具体物料特性，通用性较差。

(四) 智能监测预警系统

智能监测预警系统通过多维度监测设备运行参数，实现故障的提前预判与预警，属于主动防护技术。该系统通常由传感器、数据传输模块、控制器与预警终端组成，监测参数涵盖温度、振动、噪声等。

温度监测多采用热电偶传感器，实时监测轴承、电机等部件温度，当温度超过 80℃ 时发出预警，但单点监测难以反映部件整体温度分布；振动监测采用加速度传感器，通过分析振动频率判断部件磨损状态，可提前 1-2 天预警故障，但易受设备运行工况波动影响；噪声监测通过声级计采集设备运行噪声，异常噪声（如金属撞击声）出现时触发预警，但其在高噪声生产环境中辨识度较低。目前多数监测系统仅能实现单一参数监测，多参数融合分析能力不足，预警准确率有待提升。

二、保护系统与装置关键技术研究

针对现有保护技术的不足，行业通过传感技术升级、控制算法优化与结构创新，推动保护系统与装置向精准化、智能化方向发展，以下从核心技术优化方向展开研究。

(一) 过载保护系统的精准控制技术

1. 多参数融合监测技术：整合电流、扭矩、振动三项参数构建过载判断模型，通过加权算法计算综合负载系数。当电机电流超过额定值的 120%、扭矩超过阈值的 110%，且振动频率异常时，判定为真实过载，避免单一参数监测的误判。采用高精度霍

尔电流传感器与应变片扭矩传感器，监测精度分别提升至 $\pm 0.5\%$ 与 $\pm 1\%$ 。

2. 自适应响应控制技术：开发分级响应控制策略，轻度过载（负载系数1.1–1.3）时，控制器控制喂料机降低进料速度；中度过载（1.3–1.5）时，启动液压推杆压缩缓冲弹簧，吸收冲击载荷；重度过载（ > 1.5 ）时，立即切断电机电源并触发报警。响应时间缩短至0.05秒，较传统电控系统提升50%。

3. 故障自恢复技术：在切断电源后，系统自动记录过载时刻的物料位置与负载数据，待故障排除后，控制齿辊低速反转至安全位置，再恢复正常运行，减少人工干预时间。

（二）异物检测与清除的智能升级技术

1. 多模态异物识别技术：融合机器视觉与毫米波雷达技术，构建异物识别系统。机器视觉采用工业级高清摄像头（分辨率 1920×1080 ）与YOLOv8算法，识别非金属异物；毫米波雷达穿透粉尘干扰，识别金属异物，二者数据融合后识别准确率提升至98%以上。

2. 自适应清除执行机构：开发液压驱动的多自由度拨料机械臂，根据异物位置与尺寸，通过PID算法控制机械臂运动轨迹，精准将异物拨至专用排料通道。针对大型异物，联动齿辊实现间歇性反转，配合机械臂完成清除，清除成功率95%。

3. 进料预判调控技术：在进料口设置激光测距传感器，实时监测进料量与物料块度，当检测到超尺寸物料时，提前控制进料挡板调整物料下落位置，避免直接冲击破碎齿，降低卡阻风险。

（三）耐磨防护装置的性能优化技术

1. 梯度耐磨材料复合技术：采用“基体层+过渡层+耐磨层”的三层复合结构，基体层选用韧性优异的Q355钢，过渡层采用镍基合金，耐磨层采用WC-Co硬质合金。通过真空扩散焊接技术实现层间冶金结合，结合强度达350MPa以上，耐磨性能较传统堆焊层提升2倍。

2. 仿生结构防护设计：模仿穿山甲鳞片结构，在衬板表面设计弧形凸台阵列，凸台高度5–8mm，间距10mm，使物料在破碎过程中形成滚动摩擦，减少滑动磨损。经试验，采用仿生结构的衬板使用寿命延长40%。

3. 磨损状态实时监测技术：在破碎齿与衬板内部嵌入电阻式磨损传感器，当磨损量达到预设阈值（通常为设计厚度的70%）时，传感器电阻值发生突变，系统立即发出更换预警，避免因过度磨损导致设备损伤。

（四）智能监测预警系统的集成创新

1. 多源数据融合平台：采用工业互联网网关，将温度、振动、噪声、磨损等监测数据统一接入云平台，通过边缘计算对数据进行预处理，剔除干扰信号，数据传输延迟控制在100ms以内。

2. 故障预测算法开发：基于长短期记忆神经网络（LSTM）构建故障预测模型，利用历史运行数据与故障案例训练模型，可提前3–5天预测轴承磨损、电机过热等故障，预测准确率达92%。

3. 可视化运维界面：开发B/S架构的运维界面，实时显示设备运行参数、保护装置状态与故障预警信息，支持远程查看与操

作，当出现紧急故障时，通过短信、APP推送等方式同步通知运维人员。

三、保护系统与装置的应用案例分析

（一）过载与异物保护系统在煤矿分级破碎中的应用

某煤矿的分级破碎设备处理原煤时，频繁因混入的废钢、大块矸石引发过载卡阻，年均停机时间达240小时，电机烧毁事故2–3起。为解决该问题，采用“多参数过载保护+多模态异物检测”综合方案：安装电流、扭矩、振动三合一传感器，构建分级响应系统；在进料口设置机器视觉与毫米波雷达融合检测装置，配备多自由度拨料机械臂。

应用后，系统对金属与非金属异物的识别准确率达99%，异物清除成功率达96%，过载误判率从15%降至2%。设备年均停机时间减少至60小时，电机烧毁事故零发生，年维护成本降低80万元，生产效率提升18%。

（二）耐磨防护装置在建筑固废破碎中的应用

某建筑固废处理厂的分级破碎设备，衬板与破碎齿因受混凝土块、钢筋的冲击磨损，每月需更换1次，维护成本高昂且影响生产连续性。采用梯度复合耐磨材料与仿生结构优化方案：破碎齿采用WC-Co/镍基合金/Q355钢复合结构，衬板采用鳞片式仿生凸台设计，并嵌入磨损传感器。

改造后，破碎齿使用寿命从30天延长至90天，衬板使用寿命从45天延长至120天，磨损预警准确率达100%，避免了因过度磨损导致的设备振动故障。年均更换次数从12次降至4次，维护成本降低65%，设备运行稳定性显著提升。

（三）智能监测预警系统在金属矿破碎中的应用

某铜矿山的分级破碎设备因地处偏远矿区，运维人员难以及时发现设备异常，常出现“小故障拖成大事故”的情况，单次故障修复成本超50万元。部署多源数据融合监测预警系统：在电机、轴承等关键部件安装温度、振动传感器，接入云平台，采用LSTM算法进行故障预测。

系统运行后，成功提前4天预测轴承润滑失效、提前3天预警电机线圈老化等故障5起，均在故障发生前完成维护，避免了设备停机损失。设备年均故障修复成本从200万元降至80万元，运维响应效率提升70%，实现了从“事后维修”到“预测性维护”的转变。

四、存在的问题与发展展望

（一）当前存在的主要问题

尽管分级破碎设备保护系统与装置已取得显著进步，但在实际应用中仍面临诸多挑战：一是多系统协同性不足，过载保护、异物检测等系统多独立运行，数据未实现深度融合，易出现防护漏洞；二是极端工况适配性差，在高温（ $> 60^\circ\text{C}$ ）、高粉尘（浓度 $> 50\text{mg}/\text{m}^3$ ）、强振动（加速度 $> 5\text{g}$ ）的恶劣环境中，传感器精度下降、装置故障率升高；三是成本与性价比失衡，智能保

护系统的初始投入较传统系统高出 3–5 倍，中小规模企业难以承受；四是标准化程度低，不同厂家的保护装置接口不统一，后期升级与维护兼容性差。

（二）未来发展展望

1. 一体化智能防护系统：构建“感知 – 决策 – 执行”一体化平台，整合过载保护、异物检测等功能，通过数字孪生技术模拟设备运行状态，实现多系统的协同控制与精准干预。开发通用数据接口，实现不同厂家装置的互联互通。
2. 极端工况适配技术：研发耐高温、抗粉尘的特种传感器，采用陶瓷封装与激光清洁技术，提升传感器在恶劣环境中的稳定性；优化装置机械结构，采用抗振动的缓冲设计，降低冲击载荷对装置的影响。
3. 低成本轻量化方案：通过模块化设计简化系统结构，采用国产替代元器件降低硬件成本；开发针对中小规模企业的经济型版本，保留核心防护功能，降低初始投入门槛。
4. 无人化运维技术：结合无人机巡检与机器人维护，实现保护装置的自动检测与故障修复；开发 AI 运维算法，通过大数据分析优化维护周期，进一步降低人工成本。
5. 绿色节能升级：采用低功耗传感器与节能型执行机构，降低保护系统的能耗；通过精准防护减少设备故障，间接降低生产

过程中的能源浪费，实现环保与高效的协同。

五、结论

分级破碎设备保护系统与装置是保障设备安全运行、降低生产成本、提升生产效率的核心技术支撑，其性能优劣直接关系到企业的生产效益与作业安全。本文通过对过载保护、异物检测与清除、耐磨防护及智能监测预警等主流保护技术的研究表明，各技术均存在优势与局限，通过多参数融合、智能算法优化与结构创新，可显著提升防护性能：过载保护系统通过分级响应控制实现精准防护；异物检测系统借助多模态识别与自适应清除提升成功率；耐磨装置通过材料复合与仿生设计延长使用寿命；智能监测系统依托数据融合与预测算法实现主动预警。

应用案例证实，优化后的保护系统与装置可有效减少设备故障停机时间 30%–70%，降低维护成本 40%–65%，显著提升生产效益。针对当前存在的协同性不足、适配性差、成本高、标准化低等问题，未来应重点发展一体化智能防护、极端工况适配、低成本方案、无人化运维与绿色节能技术，推动保护系统向更精准、更可靠、更经济的方向发展，为分级破碎设备的高效稳定运行提供全方位保障。

参考文献

-
- [1] 任瑞生. 分级破碎机联轴器失速保护装置的改进 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(S1): 154–156. DOI: CNKI:SUN:MKSJ.0.2018-S1-049.
 - [2] 史月鹏. 分级破碎机电气控制应用分析 [J]. 能源与节能, 2019, (03): 165–166. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/t.d.2019.03.072.
 - [3] 刘侠. 分级破碎机中电气控制技术的运用思考 [J]. 现代信息科技, 2018, 2(12): 156–158. DOI: CNKI:SUN:XDXK.0.2018-12-058.
 - [4] 李朋. 分级破碎机失速保护装置的技术改造 [J]. 煤矿机械, 2017, 38(09): 106–107. DOI: 10.13436/j.mkjx.201709040.
 - [5] 亓愈. 双齿辊分级破碎机保护系统的研究探讨 [J]. 煤炭技术, 2014, 33(07): 177–179. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2014.07.065.