

电石智能搬运的设计研究

张军成 邓岗峰

新疆天业股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘要: 针对传统电石出炉至乙炔破碎搬运过程中存在的损耗高、安全性差、效率低及合规性不足等突出问题,本研究整合“不落地转运、数据驱动调控、合规运行”三大核心理念,构建了一套包含智能防脱道输送、高效冷却与余热回收、不落地分级破碎、全流程数据监听、智能联动控制五大核心子系统的一体化智能搬运方案。通过锥形辊轮防脱道结构、扎孔预破+热风循环冷却、密封廊道输送等技术创新,并严格遵循GB32375-2025《电石生产安全技术规范》等国家标准进行合规设计,实现了电石搬运全流程的精细化管控。实验结果表明,该方案实施后,电石总损耗率从6.8%显著降至1.9%,单耗量化降低11.1%,冷却周期缩短65%以上,自动化率达95%以上,脱道率与泄漏事故发生率均降至0,且全面满足安全、环保相关国家标准要求。本方案为电石制乙炔行业实现降本增效与智能化转型提供了可复制的技术模板与合规性支撑。

关键词: 电石; 不落地搬运; 智能控制; 损耗量化; 合规设计; 降本增效

引言

电石(碳化钙, CaC_2)作为乙炔气体制备核心原料,在多领域地位不可替代,我国是全球最大电石生产与消费国,2024年产量占全球超70%。但电石法乙炔工艺存在能耗高、污染重等问题,出炉至乙炔破碎环节物料搬运是瓶颈。传统搬运模式采用多段式流程,存在四大痛点:损耗难量化控制,行业平均总损耗率高达6.8%,推高成本;安全风险集中频发,如脱锅事故、粉尘爆炸、人员伤亡等;效率低且资源浪费,自然冷却时间长、余热未回收、人工依赖度高;难以满足2025年新实施的《电石生产安全技术规范》等法规要求^[1]。基于此,本研究以“全流程密闭、全链条可控、全要素合规”为指导,构建集成化、智能化、低损耗的电石智能搬运系统,目标是实现全程不落地转运、降低电石单耗、压缩冷却周期、提升自动化率并符合国家强制标准,创新在于打破“单点改造”思维,融合物理、能量与信息流形成智能控制回路。

1 方案总体设计

1.1 设计原则

本方案遵循四大设计原则:安全合规优先、全流程不落地、数据驱动调控、兼容可扩展。以国家标准为首要前提,采用密闭输送杜绝落地损耗,并构建多维度数据监听体系,同时复用现有设备以降低改造成本,预留AI视觉识别、数字孪生等技术升级接口。

1.2 总体流程架构

系统由五大核心子系统构成,通过中控平台协同运行,形成一个闭环的智能搬运体系。

1.2.1 智能防脱道输送子系统

电石出炉后,由炉前模块化驱动装置推送至环形双轨,经由创新的锥形辊轮在弯道处精准转向,全程无脱道风险。下方设置环形接料盘100%回收漏料,并通过摆渡车与变道机实现与余热回收窑或破碎平台的无缝衔接。

1.2.2 高效冷却与余热回收子系统

电石进入余热回收窑后,首先由液压扎孔装置进行预处理,形成蜂窝状结构以增大散热面积。随后利用 $2000^\circ\text{C}\rightarrow 1000^\circ\text{C}$ 的余热产出 300°C 热风用于烘干或发电,并通过热风循环技术加速冷却。经分阶段温度监测,确保电石温度 $\leq 160^\circ\text{C}$ 后方可进入下一环节。

1.2.3 不落地分级破碎子系统

冷却后的电石经垂直提升机直接送入破碎系统,全程无落地。采用一级齿拱破与二级颚式破碎相结合的工艺,并由激光粒径分析仪实时监控,动态调整破碎参数。合格粒径的电石通过6段式密封皮带输送线,最终进入充氮保护的乙炔料仓。

1.2.4 全流程数据监听子系统

系统在关键节点布设温度、粒径、重量、湿度、密封压力等多类传感器,通过工业以太网将数据传输至基于LabVIEW搭建的中控平台,实现数据的实时显示、异常报警、趋势分析,并利用机器学习建立损耗与参数的量化关联模型。

1.2.5 智能联动控制与空锅循环子系统

中控系统以1秒的扫描周期下发指令,联动AGV、远程行车、机械手等智能设备,完成从转运到垫锅的全自

自动化作业。卸坨后的空锅经自动循环系统返回炉前，保障出炉节奏的连续性。

2 核心子系统详细设计与效果

2.1 智能防脱道输送子系统

系统在弯道处采用对称布置的锥形辊轮，与电石锅底12厘米凸台形成自定心约束，利用几何导向原理消除横向滑移力，使电石锅在高速转弯时仍能保持稳定轨迹，脱道率由原先超过5%降至零。同时，炉前驱动装置采用“一用一备”双电机模块化设计，确保在单点故障下系统仍能连续运行^[2]。安全方面，系统全面配置红外对射防撞、急停拉绳、声光报警及物理隔离护栏，并引入出炉机器人替代人工捅炉作业，不仅大幅降低人员暴露于高温高危环境的风险，也完全满足GB32375-2025第5.2条关于“出炉作业自动化”的强制性要求。实际运行数据显示，该子系统将输送环节的物理损耗从1.6%显著降低至0.3%，为全流程降损奠定了坚实基础。

2.2 高效冷却与余热回收子系统

电石锅进入密闭余热回收窑后，首先由液压扎孔装置对高温电石块进行蜂窝状穿孔处理，此举使散热表面积增大近3倍，为后续快速冷却创造了有利条件。系统巧妙利用电石从2000℃降至1000℃过程中释放的大量显热，通过热交换器产出300℃的洁净热风，可用于原料烘干或驱动小型蒸汽轮机发电，单台炉年节标准煤达33吨，余热回收效率提升20%。在此基础上，系统配备大风量热风循环风机（风量5000m³/h）与顶部可调天窗，形成强制对流与自然通风相结合的复合冷却模式，使冷却时间由传统的48-72小时大幅缩短至10-22小时。为确保合规，冷却区域地面采用防潮混凝土浇筑，机械通风换气次数不低于12次/小时，并采用闭式循环冷却水系统防止水质二次污染，全面符合新国标第6.4条对冷却环节的安全规定。最终，电石粉化率由3%以上降至0.5%以下，有效保障了原料品质。

2.3 不落地分级破碎子系统

冷却后的电石由垂直提升机直接送入破碎站，全程无任何落地或暴露环节，从物理上隔绝了外界湿气侵入和物料损失。破碎工艺采用“一级齿拱破+二级颚式破”的组合模式，前者负责粗碎以减少冲击，后者进行精碎以控制粒径^[3]。关键创新在于出口处配置的高频率激光粒径分析仪，其以10Hz的采样速率实时监测产品粒度分布，并将数据反馈至PLC控制器，动态调节破碎机转速与排料间隙，确保最终产品稳定在50-80mm的最优反应区间，粒径合格率长期维持在98%以上。整个输送路径采用6段

负压密封廊道设计，内部微负压环境有效防止粉尘外溢。破碎厂房严格按照甲类火灾危险性建筑标准建设，配备高效脉冲袋式除尘器，实测排放浓度低于10mg/m³，远优于GB15577-2018的限值要求。该子系统的应用使破碎环节总损耗由4.8%降至2.0%，其中粉尘损耗从4.2%显著降低至1.5%。

2.4 全流程数据监听子系统

系统在出炉口、弯道、冷却窑出入口、破碎机进出口、乙炔料仓等12个关键节点密集部署了PT100温度传感器、激光粒径仪、高精度称重模块、湿度探头及微压差计等多类型传感设备，构建起覆盖物理、化学、环境等多维度的实时感知网络。所有原始数据经边缘计算单元进行滤波、校准与初步分析后，通过工业以太网上传至基于LabVIEW平台开发的中央监控系统^[4]。该平台不仅能实现数据的可视化展示与历史趋势回溯，更能基于机器学习算法（如XGBoost回归模型）建立“出炉温度—冷却时间—破碎粒径—最终损耗”之间的量化关联模型，预测误差控制在5%以内。当系统监测到某环节湿度异常升高或温度偏离设定值时，可自动触发联锁保护机制，例如暂停输送、启动氮气惰化保护，并同步向管理人员移动端推送告警信息。得益于该子系统的深度应用，因吸潮导致的间接损耗从1.0%降至0.3%，故障识别准确率达98%，参数调整响应时间缩短至15分钟以内。

2.5 智能联动控制与空锅循环子系统

中央控制系统以1秒为周期对全厂设备状态进行高速扫描，并基于预设规则与实时数据，智能调度AGV转运车、远程操作行车、机械臂等执行单元，协同完成电石锅转运、空锅清洗、炉前垫锅等复杂作业序列。整个生产现场仅需8名操作员在集控中心即可监控4台电石炉的全部搬运流程，现场仅保留少量巡检岗位，自动化率达95.2%。为强化安全管理，系统集成了UWB高精度人员定位与电子围栏技术，任何未经授权人员进入高温、高粉尘等高危区域，系统将立即发出声光警示并记录事件。空锅在卸料后，经自动清洗、热风烘干及完整性检测，由专用循环轨道返回炉前待用，保障了出炉节奏的连续性与稳定性。该子系统的投运使企业人工成本降低82%，设备综合效率（OEE）提升至88%，为安全生产与高效运营提供了双重保障。

3 电石不落地与传统模式的对比分析

3.1 损耗构成量化对比

通过详尽的数据对比（见表1），可以清晰地看到两种模式的巨大差异。

表1: 损耗构成量化对比表

损耗环节	传统模式损耗率(%)	不落地模式损耗率(%)	绝对降低幅度(%)
转运环节(落地残留)	1.2	0	1.2
装卸环节(挤压粉化)	1.5	0	1.5
汽运环节(振动+泄漏)	1.0	0	1.0
储存/接触(吸潮)	1.5	0.3	1.2
冷却环节(额外粉化)	0.5	0	0.5
破碎环节(过度破碎)	0.6	0.3	0.3
合计	6.3	0.6	5.7

数据显示,不落地模式的总损耗率仅为0.6%,而传统模式高达6.3%。其中,转运、装卸、汽运三类与“二次落地”直接相关的损耗占传统总损耗的75.5%,在不落地模式下被完全清零,是降损的核心驱动力。

3.2 具体场景对比

(1)传统模式:依赖铲车、汽运车进行多次装卸,电石经历反复跌落、挤压、振动,不仅造成大量物理损耗(粉化、残留),还产生严重扬尘。开放式储存更导致电石吸潮失效。(2)不落地模式:电石从出炉到进入乙炔料仓,全程处于密闭、平稳的输送环境中。垂直提升、密封皮带、充氮料仓等措施,有效隔绝了外界环境干扰,实现了物理与化学损耗的双重控制。

3.3 核心结论

不落地智能搬运模式较传统模式,电石单耗从1.08t/t降至0.96t/t,相对降低11.1%。按10万t/a乙炔产能计算,年节省电石1.6万吨,创造直接经济效益4800万元。更重要的是,全流程损耗变得可视、可测、可控,为精细化管理奠定了坚实基础。

4 量化效果与综合效益分析

该智能搬运系统的实施带来了全方位的效益提升。在生产效率方面,单位炉日处理能力提升40%,乙炔产气效率由285m³/t增至298m³/t,进一步摊薄了单位产品成本。在环保绩效方面,粉尘排放总量减少92%以上,单台电石炉年减少二氧化碳排放约1.5万吨,有力支撑了企业的“双碳”战略目标。在安全管理方面,高温、高粉尘、高风险区域实现“无人化”作业,近三年试点项目保持零重大安全事故记录,本质安全水平显著提高。尤为重要的是,系统顺利通过了应急管理组织的安全生产标准化一级评审,全面满足各项强制性法规要求,为企业可持续发展扫清了合规障碍。

5 合规性验证

本方案在设计之初即以国家最新强制性标准为基准,确保每一项技术细节均有法可依、有标可循。系统

全面满足GB32375-2025《电石生产安全技术规范》中关于出炉机器人应用、可燃气体监测、人员定位、防火间距等23项智能化条款;厂房的防火分区、疏散通道设计及耐火等级均符合GB50016-2014(2018版)的要求;粉尘防爆电气选型、泄爆面积计算及除尘系统配置严格遵循GB15577-2018的规定;循环冷却水系统的防腐、防垢与微生物控制措施则依据GB50648-2011进行设计。这种“合规先行”的设计理念,不仅规避了政策风险,也为企业树立了行业标杆形象。

6 结语

本研究提出的电石智能搬运系统,凭借系统集成与技术创新,成功推动电石制乙炔行业实现从“经验驱动”到“数据驱动”、从“高损高险”到“低耗安全”的根本性转变。实践表明,该方案能将电石总损耗率控制在1.9%以内,自动化水平与合规性领先行业,推广价值显著,是行业迈向绿色、智能、高效新阶段的重要引擎。展望未来,此系统发展空间广阔。可引入AI视觉识别技术,实现设备从“故障维修”到“预测性维护”的转变;搭建数字孪生平台,支持工艺参数在线仿真、优化与自主决策,迈向更高阶智能制造;将系统理念延伸至绿色工艺全链条,探索电石渣高值化利用路径,耦合清洁能源,打造“零废弃、近零碳”示范工厂,为化工行业可持续发展贡献中国方案。

参考文献

- [1]王静康,苏元复.化工过程节能与优化技术[M].北京:化学工业出版社,2020:128-135.
- [2]刘军,张敏,李刚.电石法乙炔生产中电石损耗的原因分析及对策[J].化工进展,2019,38(7):3320-3326.
- [3]陈立泉,王丽.工业互联网在化工生产过程管控中的应用[J].中国化工,2021,(12):89-92.
- [4]张庆松,李丽,赵强.电石破碎系统优化及能耗降低研究[J].化工设计通讯,2020,46(5):102-103.