

现代电石冶炼工艺与过程控制技术

马启琛 高 雄 李云飞 杨振德

内蒙古鄂尔多斯电力冶金集团股份有限公司氯碱化工分公司 内蒙古 鄂尔多斯 016064

摘 要：电石冶炼作为高能耗化工过程，原料处理品质与过程控制精度直接决定产品质量与能效水平。原料经破碎、筛分、干燥与配比混合后入炉，在电弧高温下完成钙源与碳源的还原反应，生成电石并经熔融分离后出炉。过程控制技术涵盖PID常规控制与智能控制两条技术路线，围绕炉温、电极位置、炉料加入量与炉内压力等关键参数实施分段调控与动态优化。工艺参数与控制参数通过双向适配逻辑实现匹配，辅助系统与核心控制经中央单元联动协同，共同支撑密闭式电石炉安全稳定长周期运行。

关键词：电石冶炼；过程控制；原料处理；电极调节；协同控制

引言：电石是有机合成工业的重要基础原料，冶炼过程涉及高温电弧反应与多相物料输送，工艺环节繁多且参数耦合紧密。原料粒度、水分与配比的波动直接传导至炉内反应状态，对电石产量与品质产生显著影响。过程控制技术的引入为参数精准调控与工况稳定维持提供了技术手段，从PID基础控制到智能自适应控制，技术演进路径清晰。工艺与控制的深度协同已成为提升冶炼能效与生产连续性的关键着力点。

1 现代电石冶炼原料处理工艺

1.1 原料种类与技术要求

现代电石冶炼以两类核心原料为支撑，分别作为钙源与碳源参与炉内反应。钙源优先选用高纯度生石灰，需严格控制杂质含量，防止杂质参与副反应或侵蚀炉衬，进而保障生产稳定性并延长设备使用寿命^[1]。碳源主要采用兰炭或冶金焦，需具备较高固定碳含量与较低灰分占比，同时需满足适宜的电阻率与机械强度，确保在高温冶炼环境中既能维持良好导电性能，又能抵御高温冲击、避免破碎，保障炉内物料均匀分布。此外，需严格管控原料中的有害元素，减少对电极的损耗及对反应过程的干扰，确保产品品质与生产连续性。在实际生产中，原料品质的波动对炉况稳定性影响尤为突出，因此入厂检验环节需严格执行取样与化学分析制度，确保每批次原料均满足工艺技术标准要求，从源头把控冶炼质量基础。同时，不同产地原料的理化性质差异较大，需建立分类管理档案，根据来源特性动态调整配比方案，避免因原料批次更换导致炉况剧烈波动。

1.2 原料破碎与筛分工艺

原料破碎与筛分的核心目标是获得粒度均匀的物料，以保障炉料透气性与反应接触面积。生石灰经颞式破碎机加工，将粒度控制在 35 至 80 毫米区间，避免粒

度过粗导致反应不完全，或过细引发炉内扬尘。碳素材料采用圆锥破碎机处理，将粒度调整至 15 至 35 毫米，兼顾反应活性与炉气流通效率。破碎后物料输送至振动筛分设备进行分级处理，未达标大块物料回流至破碎环节二次加工，同时剔除细粉以降低炉内堵塞风险，同步通过磁选装置去除铁质杂质，规避设备磨损与反应干扰问题。筛分环节还需根据季节变化与原料含水率的不同，适当调整筛网孔径与振动频率，确保在雨季等高温条件下仍能维持稳定的筛分效率。此外，破碎机锤头与衬板的磨损情况需纳入日常巡检范围，磨损超标后应及时更换，避免因破碎效果下降导致粒度分布不均，进而影响炉内透气性与反应均匀性，最终制约电石产量的稳定输出。

1.3 原料干燥处理工艺

原料干燥处理的核心的是控制物料水分含量，消除对电石冶炼过程的不利影响。碳素材料吸湿性较强，入炉前需经干燥设备预热处理，彻底去除吸附水分，防止水分在高温炉内分解产生有害气体，同时避免额外消耗电能。生石灰吸湿性相对较弱，但仍需采取密闭仓储措施，搭配干燥系统维持适宜湿度，防止吸潮结块影响下料顺畅性。干燥过程中需实时监测物料湿度，根据监测结果动态调整干燥参数，确保物料水分指标稳定符合冶炼要求，为后续工艺环节提供可靠保障。

1.4 原料配比与混合工艺

原料配比与混合是保障炉内反应稳定的关键工序，需依据原料化学成分分析结果，精准调控两类核心原料的比例，平衡反应速率与能耗水平。配比过程采用自动化称重设备，精准控制各原料输送量，降低计量误差对反应的影响。配比完成后，物料送入专用混合设备，通过复合搅拌方式实现均匀混合，避免局部原料比例失衡

导致炉内反应不均衡。混合均匀后的物料直接输送至炉顶料仓，减少转运过程中的物料分离，确保入炉物料成分均一，为稳定的冶炼反应奠定基础。

2 现代电石冶炼核心与辅助工艺

2.1 冶炼核心工艺环节

炉料入炉通过自动化加料系统完成，经炉顶料仓精准输送至炉内，遵循分层布料原则，保障炉料分布均匀，为后续反应创造良好条件。电弧的产生依赖电极与炉料间的强电场发射和热电子发射，电子在电场力作用下加速运动并发生碰撞游离，形成自持放电现象，热游离则保障电弧持续稳定燃烧。高温冶炼反应在炉内高温环境中逐步推进，钙源与碳源发生还原反应生成电石及副产物，反应过程中需维持炉内稳定氛围，确保反应充分进行^[2]。电石熔融与分离依托炉内高温使生成的电石转化为熔融态，利用密度差异实现与炉渣的自然分离，保障电石纯度。电石出炉通过炉体出铁口完成，出炉前需清理炉口以确保出料顺畅，出炉后及时处理炉口，为下一轮冶炼做好准备。

2.2 冶炼辅助系统工艺

电极系统由电极本体、把持器等部件组成，把持器负责将大电流流向电极并调节电极高度，通过液压自动调节系统实现电极平稳压放与升降，保障电极在炉内稳定运行。炉体冷却系统采用循环水冷模式，冷却水流经炉体关键部位，吸收高温热量并循环冷却，防止炉体因高温受损，维持炉体结构稳定。烟气收集与处理通过半封闭烟罩收集炉内烟气，经降温预处理后进入除尘设备，去除烟气中粉尘与有害成分，处理后的烟气达标排放，收集的粉尘可回收再利用。供电系统为冶炼过程提供稳定电能，通过合理配置变压器与供电线路、调节供电参数，匹配炉内反应需求，保障冶炼过程稳定供电，避免电压波动影响反应进程。

3 现代电石冶炼过程控制技术

3.1 过程控制基础体系

过程控制目标围绕冶炼过程稳定性、参数精准度与生产连续性展开，覆盖原料处理、炉内反应、设备运行全环节，为控制体系运行提供明确导向。相关参数涵盖工艺与控制两大维度，工艺侧聚焦原料特性、炉内反应状态等工况指标，控制侧围绕温度、电流、压力等核心维度设定，形成覆盖全流程的参数管控体系。控制体系由检测单元、控制单元、执行单元构成，采用分层架构设计，各单元分工清晰且高效衔接，构建从信号采集、分析处理到指令执行的闭环运行模式。控制信号采集通过各类适配传感器完成，针对不同控制参数选用对应检

测设备，采集的信号经调理模块处理后，通过有线传输方式精准送达控制单元，传输过程中采取抗干扰措施，保障信号完整与传输稳定，为控制指令的科学下达提供可靠数据支撑。

3.2 关键工艺参数控制方法

炉温控制采用分段调控模式，结合炉内不同区域温度差异，通过调节电极功率与炉料分布实现精准管控，实时捕捉温度变化并动态优化调控策略，避免炉温异常影响反应进程与产品品质。电极位置与电流控制通过液压调节机构与电流调节模块协同运作，根据炉内反应状态灵活调整电极插入深度与供电电流大小，使电极位置与电流始终适配炉内反应需求，保障电弧稳定与反应充分。炉料加入量与速度控制依托自动化称重与输送系统，根据炉内反应进度动态调控，避免加料过多造成炉内堵塞、过少影响反应连续性，实现炉料供给与反应需求的精准匹配。炉内压力控制通过专用检测设备实时捕捉压力变化，调节排气阀门开度，将炉内压力维持在适宜范围，防止压力过高引发泄漏、过低影响炉气流通，保障冶炼环境稳定。

3.3 控制技术类型与应用

常规自动控制技术以PID控制为核心，应用于冶炼过程中参数的基础调控，通过预设控制阈值，自动调节执行机构动作，实现参数稳定控制，适配冶炼过程中相对稳定的工艺环节，保障基础生产连续性。智能控制技术结合大数据、算法模型与工业互联网技术，针对冶炼过程中多变量、非线性、大时滞的复杂特性，对复杂多变的参数进行精准预判与调控，能够自适应炉内反应波动，优化调控精度，减少人工干预，适配复杂冶炼工况。控制系统联动与协调通过中央控制单元实现，整合各子系统控制信号，协调各执行机构动作，规避不同系统调控冲突，打通生产执行层与过程控制层的数据壁垒，确保冶炼全流程、各环节控制协同一致，提升整体控制效率与稳定性。

3.4 过程控制设备与维护

控制检测设备涵盖温度传感器、压力传感器、电流传感器等多种类型，各类设备分别适配不同控制参数的检测需求，可精准捕捉参数变化并转化为可传输信号，为控制决策提供数据支撑，部分高精度传感器可实现参数实时监测与异常预警。控制执行设备包括液压调节装置、阀门、输送泵等，运行过程中需定期检查设备运行状态，清理设备杂物、补充润滑油，及时处理设备轻微故障，避免设备故障影响控制效果，保障执行机构动作精准高效。控制系统日常检修需定期检查线路连接状

态, 排查信号传输故障, 调试控制参数阈值; 调试过程中结合冶炼工艺需求, 优化控制算法与调控逻辑, 完善系统联动机制, 确保控制系统始终处于最佳运行状态, 保障冶炼过程控制稳定可靠, 助力提升生产能效与安全水平^[1]。

4 现代电石冶炼工艺与控制技术的协同运行

4.1 工艺参数与控制参数的匹配调整方式

工艺参数与控制参数的匹配调整立足冶炼全流程工况, 搭建双向适配逻辑, 根据工艺参数的实时波动优化控制参数设定, 契合现代密闭式电石炉安全稳定长周期运转的核心需求。工艺参数聚焦原料特性、炉内反应状态等实际工况指标, 涵盖原料粒度分布、炉内反应氛围、物料输送状态等关键维度; 控制参数围绕工艺优化目标精准设定, 涵盖温度调控阈值、电流电压范围、物料输送速率等内容, 两者形成相互适配、相互支撑的运行关系。调整过程中依托各类高精度检测设备捕捉工艺参数变化, 结合原料处理、核心冶炼等不同工艺环节的特性, 优化控制参数阈值, 确保控制参数能够精准响应工艺参数波动, 避免控制与工艺脱节。针对不同工艺环节的运行特点, 分别建立工艺与控制参数的适配标准, 通过分层调整实现各环节参数精准对应, 兼顾原料预处理的精准性与核心冶炼的稳定性, 为两者协同运行筑牢基础, 助力提升碳素原料利用率与系统综合能效。

4.2 冶炼过程中控制策略的动态调整方式

冶炼过程中控制策略的动态调整依托实时工况反馈, 结合冶炼不同阶段的反应特性, 灵活优化调控逻辑, 摒弃固定不变的调控模式, 适配炉内固-液-气多相反应体系的复杂变化规律。冶炼过程中存在原料成分波动、炉内反应状态变化等变量, 此类变量会直接影响反应热力学平衡与动力学速率, 因此控制策略需根据这些变量实时调整。通过采集炉温、炉压、电极状态等关键参数, 分析参数变化趋势, 预判炉内反应走向, 针对性优化调控方式, 兼顾控制精度与工艺稳定性。调整过程中需避免过度调整引发工况波动, 同时确保控制策略能够快速响应工艺变化, 及时纠正参数偏差, 维持冶炼过程平稳推进, 抑制电极异常波动与炉况失衡现象。借助自适应调控逻辑, 实现控制策略与冶炼工况的精准适

配, 减少非计划停机时间, 提升设备综合效率, 契合现代电石冶炼智能化调控的发展趋势。

4.3 辅助系统与核心控制的协同运行方式

辅助系统与核心控制的协同运行通过中央控制单元实现, 整合辅助系统运行数据与核心控制参数, 构建高效联动机制, 确保两者无缝衔接, 支撑密闭式电石炉的高效安全运行。辅助系统涵盖电极、冷却、供电、烟气处理等关键环节, 其运行状态直接影响核心控制效果, 而核心控制则为辅助系统运行提供明确导向, 形成双向联动、协同发力的运行格局。电极系统运行数据实时反馈至核心控制单元, 核心控制根据炉内反应需求, 调整电极升降与压放参数, 维持电极工作端稳定, 避免电极偏移导致的炉壁过热或炉底冷区形成。冷却系统与炉温控制协同运作, 核心控制根据炉温变化调节冷却水流速与流量, 避免炉体过热或冷却不足, 延长炉衬使用寿命。供电系统按照核心控制下达的参数需求, 调节电压与电流, 为核心冶炼提供稳定电能, 减少无功损耗。烟气处理系统配合炉压控制, 调节排气速率, 维持炉内微正压环境, 避免炉气泄漏或空气吸入, 实现辅助系统与核心控制的深度协同, 保障冶炼全流程稳定高效。

结束语

现代电石冶炼工艺已形成从原料处理到核心反应再到出炉冷却的完整技术链条, 过程控制技术则为各环节参数的精准调控提供了系统支撑。原料破碎筛分、干燥配比与混合工序的规范化操作, 为炉内反应创造了均匀稳定的物料条件; PID控制与智能控制的分级应用, 使炉温、电极位置、炉内压力等参数得到有效管控; 辅助系统与核心控制的联动协同, 进一步提升了密闭式电石炉的运行稳定性与能效水平。工艺与控制的持续融合, 将继续推动电石冶炼向高效、安全、智能化方向迈进。

参考文献

- [1]高刚,何学玲.变频调速技术在电石冶炼配料系统中的应用[J].化工管理,2021(22):58-59,94.
- [2]黄祥,陶逸倩,韩雨岐,等.电石渣稳定锌冶炼浸出渣中可溶性重金属研究[J].环境科学研究,2025,38(2):395-406.
- [3]王大伟,刘强,火瑞钦,等.密闭式电石炉智能冶炼技术研究应用[J].设备管理与维修,2024(11):16-18.