

电石冶炼过程控制与工艺优化研究

杨振德 高 雄 马启琛

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、高复杂度的化工生产过程，其运行稳定性与效率直接关联生产效益与能耗水平。本文聚焦原料质量管控、电石炉核心参数控制、自动化智能化技术应用及节能降耗工艺优化四大核心方向，系统梳理石灰、碳材、电极糊等原料对冶炼过程的影响，优化电极系统、炉压炉气等核心参数控制策略，整合自动化控制技术与节能路径，实现冶炼过程精准管控与工艺升级，有效提升生产效率、降低能耗与原料损耗，为电石冶炼行业高质量运行提供技术支撑。

关键词：电石冶炼；过程控制；工艺优化；原料管控；节能降耗

引言：电石作为有机合成、冶金等行业的核心原料，其冶炼工艺的稳定性与优化程度对行业发展具有重要意义。当前电石冶炼行业普遍面临能耗偏高、原料利用率不足、过程控制精度有限等问题，制约行业绿色高效发展。原料质量波动、核心参数调控不当、自动化水平不足等因素，易导致炉况失衡、生产效率下降。因此，开展电石冶炼过程控制与工艺优化相关研究，梳理关键影响因素，优化控制策略与工艺路径，对推动行业节能降耗、提升生产稳定性具有重要现实意义。

1 原料质量对冶炼过程的决定性影响

1.1 石灰原料的粒度与活性度控制

生石灰活性度本质为CaO参与造渣反应的动力学能力，其数值高低由煅烧温度与晶体结构决定，高活性石灰具备发达孔隙结构与大比表面积，可显著加快脱硫脱磷反应速率，活性不足则造渣滞后、冶炼周期延长且杂质去除效率下降^[1]。生过烧量直接影响有效CaO占比，生烧石灰含未分解碳酸钙，高温分解吸热降低炉温并削弱渣化能力；过烧石灰晶体致密、孔隙闭合，反应活性大幅衰减，MgO杂质过量会破坏炉渣碱度平衡，诱发炉渣黏稠、炉底结瘤等问题。入炉石灰粒度与粉料含量决定料层空隙结构，粒度过大则接触面积不足、反应滞后，过小或粉料占比过高会堵塞气流通，降低料面透气性，引发炉压波动、局部过热及还原反应不充分等连锁问题。

1.2 碳材原料的多维度品质管控

固定碳、灰分、挥发分、水分四大指标相互关联并共同作用于冶炼进程，固定碳含量决定发热值与还原能力，含量不足会导致炉温偏低、还原反应弱化；灰分过高不仅降低碳材有效利用率，还会增加炉渣生成量并侵蚀炉衬；挥发分过高易引发炉内压力骤变与烟气量激

增；水分超标则吸热降温并诱发料管黏堵。碳材粒度与比电阻呈非线性匹配关系，粒度偏粗会使比电阻偏低、电流分布不均，影响电极下插深度与熔池热场均匀性；粒度偏细则比电阻偏高、电能损耗增加，需依据炉型与供电参数匹配合理粒度区间。碳材水分超标会与CaO反应生成消石灰，体积膨胀引发料管堵塞、下料不畅，进而导致炉压失稳、热制度紊乱，形成水分超标—消石灰生成—料管堵塞—炉压波动的连锁负面效应。

1.3 电极糊的配方与性能优化

固体原料组分选择需兼顾结构强度与导电特性，电煅无烟煤、石墨碎等骨料需具备低灰分、高纯度与适宜粒度级配，构建稳定导电骨架并保障高温结构完整性，杂质含量过高会降低导电性并诱发电极局部过热。粘结剂配比与混捏成型工艺决定电极烧结质量，煤沥青等粘结剂需控制合理结焦值，配比不当会导致烧结后强度不足或导电性变差；混捏温度、时间需精准管控，确保粘结剂均匀包裹骨料颗粒，形成致密均质结构，避免分层或开裂缺陷。挥发分含量需随季节差异化调控，冬季环境温度低、散热快，可适度提高挥发分以保障烧结速度；夏季温度高、散热慢，需降低挥发分防止过烧，维持电极液化—固化—烧结过程稳定。电极软断源于烧结不足、强度偏低，多与挥发分过高、混捏不均相关；硬断由热应力集中、结构缺陷导致，压放控制需匹配烧结速度，避免过快引发软断、过慢诱发硬断，保障电极连续稳定工作。

2 电石炉过程核心参数控制

2.1 电极系统控制

三相电极做功点位置的平衡维持是电极系统控制的核心，直接决定炉内热场分布均匀性与反应效率。做功点偏移会导致局部反应过度或不足，引发炉况失衡，

需通过精准调节电极升降幅度,实时校正各相做功点位置,确保三相在熔池内形成稳定对称的反应区域^[2]。电极压放与升降的联动控制需依托动态调节机制,实现压放量、工作长度、消耗速率的三平衡。压放量需匹配电极消耗速率,压放量一般控制在每班150~300mm,避免压放过多导致工作长度过长、电流分布不均,压放不足则会使工作长度过短、电极损耗加快,同时结合升降调节,动态适配炉内反应需求,维持电极工作状态稳定。一次电流、一次电压、电极电流、电极电压、有功功率的协同调节是保障电极系统稳定运行的关键。各参数间存在紧密关联,一次电压调整需同步适配一次电流变化,避免电压过高引发电极击穿、过低导致能耗攀升;电极电流与电压的调节需贴合有功功率需求,通过精准调控实现电能高效转化,减少无效能耗,保障电极做功效率与炉内反应稳定性。

2.2 炉况判断与操作调整

电石属于密闭冶炼工况,无法直观观测炉内火焰状态,需依托电气参数、炉压、炉气指标综合判别炉况。运行参数波动幅度可直观反映反应状态,三相电流偏高且波动剧烈,炉气一氧化碳占比同步上升,代表炉内反应过激、局部温度超标;电流偏低、分布失衡,炉压频繁异动,则说明反应强度不足、料层透气性能变差,或是原料反应活性未达标。原料下料不均易引发偏料问题,石灰局部偏加会提升炉渣碱度与黏度,阻滞电极下行,造成电极悬置偏高;碳材过量堆积会强化局部还原反应,炉温异常攀升,致使电极过度下探。生产中需及时微调下料频次与布料均匀度,修正物料分布偏差,让电极回归正常作业区间。日常依托系统设定的参数阈值识别异常,实时监测电流、电压、炉温等关键数据,精准判定故障诱因。按照既定调控方案调整电极位置、优化物料配比、更改供电参数,快速平复炉况波动,规避异常工况持续扩大,保障冶炼过程平稳有序推进。

2.3 炉压与炉气控制

微负压至微正压操作区间的严格维持是炉压控制的核心要求,炉压一般控制在 $\pm 10\text{Pa}$ 范围内,直接影响炉内反应环境与生产安全。炉压过高会导致炉气泄漏,引发能源浪费与安全隐患,还会阻碍炉内烟气排出,破坏反应平衡;炉压过低则会吸入空气,导致炉气组分异常,加剧炉衬氧化侵蚀,需通过调节烟道阀门开度,实时稳定炉压在合理区间。炉气温度、压力及组分的在线检测是炉气控制的基础,炉气温度通常维持在200~400℃,通过高精度检测设备实时捕捉各项指标变化,精准掌握炉内反应状态,为后续调节提供数据支撑。炉

气组分异常与净化系统的联锁逻辑需实现精准联动,当检测到炉气中一氧化碳、二氧化碳等组分含量超出标准阈值时,净化系统需自动启动对应调节程序,调整净化介质用量与运行参数,确保炉气净化效果,同时避免异常组分积累引发的设备腐蚀与环保风险,保障生产连续稳定进行。

3 自动化与智能化控制技术的深度应用

3.1 DCS控制系统的功能架构

DCS控制系统依托完整技术链路实现电石炉参数的精准管控,三相电流采样通过高精度传感器捕捉实时电流信号,经精密整流模块完成信号转换与滤波处理,消除干扰信号对检测精度的影响,再传输至CPU进行运算比较,结合预设参数阈值完成偏差分析,最终通过PIO输出模块发送控制指令,驱动电极卷扬机完成升降与压放动作,形成闭环控制链路。电流量程分档需结合冶炼负荷变化设计多级档位,搭配季节性切换策略,冬季环境温度低、原料反应活性下降,需调整量程档位适配较低电流需求,夏季温度偏高、反应速率加快,切换至对应高档位,确保电流检测精准度与控制响应速度^[3]。手动/自动转换功能需兼顾操作灵活性与控制稳定性,自动模式下系统依据实时参数自主完成调节,手动模式供操作人员根据炉况灵活干预,故障应急停机功能需预设多重触发条件,当检测到电流、电压等核心参数异常或设备故障时,快速切断相关执行机构电源,避免故障扩大,保障设备与人员安全。

3.2 APC先进过程控制的多软件协同

多变量预测控制在配料与电极调节中发挥核心作用,通过软件算法对原料配比、电极位置等多变量进行预判,提前调节配料量与电极状态,规避参数波动对炉况的影响,实现配料精准化与电极调节精细化。智能控制与故障诊断依托多软件协同运行机制,智能控制模块实时接收各检测点数据,动态优化控制策略,适配炉况变化;故障诊断模块持续监测设备运行状态与参数变化,精准识别异常隐患,区分设备故障与参数波动引发的异常。软测量技术通过间接检测相关参数,弥补直接检测的局限性,结合平稳控制算法,抑制炉况随机波动,减少参数突变对反应过程的干扰,维持炉内反应稳定,降低能耗与原料损耗。

3.3 计算机可视化与自动诊断技术

工艺过程图形化展示将电石炉运行全流程转化为可视化界面,清晰呈现各设备运行状态与核心参数变化,参数实时追踪功能可记录历史数据,便于操作人员回溯分析,快速定位参数波动原因。配料顺序自动安排由软

件根据原料特性与冶炼需求,规划合理配料时序,同时完成各料仓配料量的计算与传送指令下发,确保配料均匀性与时效性,避免人为操作偏差。参数异常的自动诊断通过对比实时参数与标准阈值,快速判定异常类型与程度,同步生成针对性调整策略,下发至各执行机构完成自动修正,缩短异常处理时间,提升炉况稳定性与生产效率。

4 节能降耗的工艺优化路径

4.1 热量利用效率提升

预热层热量回收与料层结构优化是提升热量利用效率的核心方向,料层结构不合理会导致空隙率分布失衡,阻碍热量传导,优化料层颗粒级配可改善这一问题,同时回收预热层散失的余热用于原料预热,有效降低炉内加热负荷,减少额外热能投入^[4]。炉气显热与烟气余热的回收利用需构建科学完整的技术路径,借助高效换热设备捕捉炉气与烟气中蕴含的热能,将其转化为生产所需热能,应用于原料烘干或生产辅助加热环节,替代传统高能耗加热方式,最大限度减少热能浪费。电阻热与电弧热的合理分配需适配炉内不同反应阶段的特性,根据反应进程动态调整两种热量的分配比例,避免单一热量消耗过量,确保热量精准作用于原料反应过程,提升热能转化效率,降低无效热损失,实现热量资源的高效利用。实际生产中,预热层温度通常在400~600℃之间,若能通过优化布料方式使料层厚度均匀化,可将预热层散热量降低约8%,相当于每吨电石节约标煤15~20kg。此外,炉气余热回收系统的换热效率受积灰影响较大,需每班安排一次清灰作业,确保换热面始终维持90%以上的传热效率,避免因积灰导致回收效果逐年衰减。

4.2 电能消耗的系统性降低

炉料灰分与电耗存在明确的定量关联机制,灰分含量越高,电能损耗越显著,需通过精细化原料预处理工艺降低炉料灰分,减少杂质含量,从而降低电能在杂质上的无效消耗,提升电能利用效率。三相电极做功点保持同平面运行能够有效提升电热转换效率,避免做功点高度偏差造成的电流分布不均,让电能均匀转化为炉内所需热能,减少电能浪费。变压器满负荷运行需与生产

负荷精准适配,避免轻载运行带来的电能损耗,同时优化进线电压,将其调整至合理区间,降低线路传输过程中的电能损耗,通过多环节协同调控,实现电能消耗的系统性管控与优化,进一步降低生产电耗成本。

4.3 原料损耗的全链条控制

碳材水分需实施从入炉到烘干的全过程精准控制,烘干阶段需严格调控温度与时间参数,确保碳材水分达到入炉标准,避免水分过高引发的反应损耗与能源浪费,入炉后需持续监测碳材水分变化,及时调整炉内反应参数,减少水分带来的原料损耗。生石灰粉料掺入量需严格限制,过量粉料会导致反应不充分,增加原料损耗,同时优化筛分工艺,通过精准筛分拦截不合格粉料,提升原料利用率^[5]。碳材筛网孔径需根据碳材粒度要求合理调整,避免粒度不符造成的筛分损耗,称量环节需强化精度管控,通过优化称量设备与流程,拦截称量过程中的原料损耗,实现原料从预处理、入炉到反应全过程的损耗管控,提升原料利用效率。

结束语

电石冶炼过程控制与工艺优化是一项贯穿原料入厂至产品出库的系统工程。石灰活性度与碳材粒度的精准匹配构成了稳定炉况的物质基础,电极做功点平衡与炉压微正压维持保障了反应环境的持续可控,DCS与APC的深度集成赋予了过程调控以智能化手段,而热量梯级利用与原料全链条损耗拦截则将节能目标落到了每一道工序。多维度技术手段的有机融合,推动电石冶炼向低耗稳定方向持续演进。

参考文献

- [1]冯爽,常彩霞,张金君,郭琳琳.基于电石渣原料的方解石型碳酸钙制备研究[J].广东化工,2021,48(18):37-38.
- [2]张小军,卢强,高银涛,等.电石生产的风险分析及安全措施[J].氯碱工业,2024,60(12):40-42.
- [3]郑福平.浅谈电石生产一体化技术的优势[J].中国高科技,2022(22):26-28.
- [4]马涛,段树涛,曹智慧,等.电石生产过程降低碳排放的措施研究[J].中国氯碱,2022(12):49-53.
- [5]彭江伟.电石生产项目建设中工程成本的有效控制[J].中国氯碱,2024(11):60-63.