

多电极黄磷电炉工艺优化与能效提升研究

陈少霞

湖北兴发化工集团股份有限公司 湖北 宜昌 443700

摘要: 黄磷冶炼作为高耗能化工过程, 多电极电炉的能耗水平直接制约产业竞争力。本文围绕多电极黄磷电炉的生产工艺与能耗构成展开分析, 从电极布局参数、炉料配比、升降调控、炉内气氛及连续化匹配等维度探讨工艺优化路径, 并就炉体保温、导电系统、炉气回收等设备结构改进方向进行论述。在此基础上, 提出炉内能量转化效率提升、多电极协同控温、热能损耗管控及全系统联动节能等能效提升策略, 为黄磷电炉降本增效提供系统性技术参考。

关键词: 多电极黄磷电炉; 工艺优化; 能效提升; 电极调控; 系统节能

引言: 黄磷是磷化工产业链的基础原料, 其冶炼过程以电热还原为核心, 电能消耗在总能耗中占据主导地位。多电极电炉虽能扩展炉内反应面积、改善电流分布, 但热场叠加、短网阻抗上升及三相电流协调困难等问题使能效提升面临瓶颈。如何在多电极结构约束下实现工艺参数与设备运行的协同优化, 已成为黄磷行业迫切需要解决的技术课题。

1 多电极黄磷电炉生产工艺与能耗构成分析

1.1 多电极黄磷电炉整体生产工艺流程

多电极黄磷电炉以磷矿石、焦炭和硅石为主要原料, 经配料混合后从炉顶加入封闭电弧炉内, 在高温还原气氛下进行连续生产^[1]。矿石中磷酸钙被碳还原生成磷蒸气, 经导出管冷凝为液态粗磷, 炉渣则定期从渣口排出。整条工艺链涵盖原料预处理、配料入炉、电热还原、磷蒸气导出与冷凝、炉渣排放及尾气处理等多个串联环节, 各环节之间的物料流转与热量传递构成了完整的生产闭环。

1.2 电炉核心生产单元运行机制

电炉内部以多根石墨电极作为发热体, 电极下端插入炉料后形成多个独立电弧放电区, 各区产生的电阻热与电弧热共同驱动炉内还原反应。电极埋入深度直接决定做功点位置, 进而影响熔池形态与炉料透气性。三相供电系统通过短网与铜瓦将电流导入各电极, 电极间的电流分配比例与炉内电阻场分布密切相关, 决定了各反应区的实际功率输出与热量释放强度。

1.3 黄磷生产全过程能耗组成结构

黄磷生产的总能耗由电耗、原料加工能耗、冷却水循环能耗及尾气处理能耗四部分构成。电耗占据总能耗

的绝大部分, 主要用于维持炉内还原反应所需的高温环境。原料加工环节涉及矿石破碎、筛分与焦炭制备, 消耗一定量的机械能与热能。冷却系统为维持设备正常运转需持续消耗电力驱动水泵运转。尾气处理与除尘装置也需额外电力支撑。

1.4 多电极结构适配生产工艺的特性短板

多电极布局虽然扩展了炉内反应面积, 但各电极之间的热场叠加容易造成局部过热, 而电极间距过大又会导致炉料中心区域温度不足。电极数量增加后短网阻抗上升, 无功损耗随之上升。多根电极的电流协调难度大, 任何一相电流波动都会引起炉况不稳, 这种结构与连续稳定生产之间存在天然矛盾。

1.5 现有生产模式下能耗损耗关键环节

炉体散热与烟气带走的显热是两个最突出的热损失通道。炉盖密封不严导致大量高温烟气逸散, 带走可观热量。电极做功点偏离最佳位置时, 电弧效率下降, 部分电能转化为无效辐射热。出渣操作期间炉温骤降, 重新升温所消耗的电能构成间歇性高损耗。炉渣排放时夹带的显热以及冷却水带走的余热均为可观的能量流失项。

2 多电极黄磷电炉工艺参数优化研究

2.1 电极布置参数优化

电极在炉内的空间排布直接决定了热场分布格局与电流通路特征。三相六电极体系中, 各电极的径向间距与纵向埋入深度需形成合理的几何约束, 间距过小导致电弧区热场相互干扰, 间距过大则炉料中心区域温度梯度不足, 还原反应难以充分推进。电极排布还需兼顾短网阻抗的均衡分配, 三相电流不平衡度越低, 整炉功率

利用效率越高^[2]。埋入深度与炉料电阻的匹配关系尤为关键,过浅则电弧暴露于炉气空间,热量散失加剧,过深则透气性恶化,磷蒸气导出受阻。

2.2 电极升降与进给工艺调控优化

电极做功点的动态位置控制是维持炉况稳定的核心手段。出渣后重新送电阶段应以低功率缓慢提升电极,避免炉料突然承受过大热冲击而发生塌料。进入高功率运行期后,电极进给速率需与炉料消耗速度保持协调,做功点长期偏离设计位置将导致局部过烧或反应不完全。周期性降低电压运行可以抑制电极过度消耗,延长单根电极使用寿命。各相电极的升降应避免机械联动,独立调节能够针对局部炉况偏差进行精准补偿。

2.3 炉料配比与入炉工艺优化

磷矿石中五氧化二磷含量、碳酸盐比例与焦炭固定碳含量三者之间存在严格的化学计量约束。硅石添加量决定炉渣的酸碱度与熔点,渣型偏酸则熔点偏高,流动性差,偏碱则对炉衬侵蚀加剧。焦炭粒度分布影响炉料透气性与电极周围的导电网络结构,细粒焦炭过多易导致炉底堆积,粗粒焦炭过多则电极与炉料接触不良。炉料入炉前的混合均匀度与成球质量也会显著影响炉内反应的稳定性,配比波动将直接传导为电耗波动。

2.4 炉内反应气氛与压力工艺调控优化

炉内还原气氛的维持依赖于焦炭过量系数与炉气排出速率之间的动态平衡。炉内微正压状态有利于磷蒸气向导出管方向流动,但压力过高会增大炉气逸散量并带走更多显热。CO分压过低意味着还原反应不彻底,过高则表明碳消耗过度,二者均不利于能耗控制。通过调节排烟罩开度与导出管抽力可以对炉内压力场进行干预,使还原气氛始终处于有利于磷生成的窗口区间内。

2.5 连续化生产工艺匹配性优化

多电极电炉的连续化运行要求配料、送电、出渣、收磷等各工序在时间轴上形成紧凑衔接。出渣周期过长导致炉内积渣增厚,透气性下降,电耗攀升。出渣周期过短则炉温反复波动,磷回收率受到影响。各相电极的功率分配应随出渣节奏进行阶段式调整,送电初期以中功率恢复炉温,待熔池稳定后逐步升至满功率运行,出渣前降功率以控制渣铁分离质量,这种分阶段功率策略是实现长周期连续运行的工艺基础^[3]。

3 多电极黄磷电炉设备结构与运行优化

3.1 多电极本体结构适配性优化设计

多电极电炉本体的结构设计需与炉内热场分布及

电流路径形成精准对应。炉壳内径与电极数量之间存在严格的几何约束关系,电极数量增多则炉径需相应扩大,否则电弧区相互干扰加剧,炉内温度场均匀性难以保证。炉底结构应适应多点做功带来的局部高温冲击,采用高导热低膨胀材质可有效延缓炉底侵蚀速率。电极夹持器的机械强度与夹持力直接影响电极在高电流密度下的稳定性,夹持不足会导致电极下滑,夹持过紧则增加升降阻力。炉体高度与电极长度的匹配决定了做功点在炉料中的垂直位置分布,过高或过低都会偏离最佳反应区。

3.2 电炉炉体保温与密封结构优化

炉体散热是黄磷电炉最主要的非工艺损失来源。传统耐火砖炉衬的导热系数偏高,大量热量经炉壁向外辐射,改用高铝质隔热砖与碳化硅复合内衬后,炉壁表面温度可大幅降低,散热量显著削减。炉盖密封性能直接关系到炉内还原气氛的维持与高温烟气的逸散量,采用水冷密封结构配合耐高温石墨垫片,可在保证密封性的前提下延长使用寿命。炉门与出渣口的密封设计需兼顾操作便利性与热量保持,频繁开合造成的热冲击会加速耐火材料开裂脱落。

3.3 导电系统与供电结构优化

短网系统的阻抗大小直接影响电能从变压器到电极的传输效率。铜管短网替代传统铜排短网后,集肤效应带来的附加损耗明显降低,电流分配更加均匀。铜瓦与电极之间的接触电阻是短网损耗的集中区域,采用高纯度铜瓦并保持接触面平整光洁,可将接触压降控制在较低水平。三相供电的不平衡会导致各电极做功功率差异过大,短网阻抗的均衡设计是实现三相功率平衡的结构前提。千斤顶夹持器的导电截面需与电极电流等级匹配,截面不足会在夹持部位产生严重发热。

3.4 炉气回收与余热利用结构优化

黄磷电炉产生的高温炉气蕴含可观的显热与化学能,直接排放造成巨大的能量浪费。在导出管与冷凝系统之间增设列管换热器,可将炉气热量用于预热入炉原料或产生蒸汽,降低后续工序的能耗负担。炉气中携带的粉尘经布袋除尘器收集后可返回配料系统,实现物料的闭路循环。尾气中未冷凝的磷蒸气通过喷淋回收装置进行二次捕集,既减少磷损失又降低环境污染负荷。炉渣排放前的显热回收可通过渣池加盖或热渣直接利用等方式实现,避免渣温过高造成的能量散失。

3.5 配套辅助设备协同运行优化

电炉的稳定运行依赖于冷却水系统、除尘系统与配

料系统的紧密配合。冷却水流量与电极夹持器、铜瓦、炉盖的热负荷需保持动态匹配,流量不足导致设备过热损坏,流量过大则浪费水泵电耗。除尘系统的抽力大小影响炉内压力场,抽力过大会将炉内热量大量抽走,抽力过小则炉气逸散污染车间。配料系统的给料速率应与炉内消耗速率保持一致,给料中断会导致电极空烧,给料过快则压死电极造成塌料。各辅助设备的运行参数需围绕电炉主工艺进行统一协调,任何单一环节的失调都会向主工艺传导并放大为能耗损失。

4 多电极黄磷电炉系统能效提升策略

4.1 炉内能量传递与转化效率优化方式

电能在炉内的转化路径涉及电弧辐射、电阻加热与传导三种机制,提升转化效率的关键在于让更多电能以有效热的形式参与还原反应^[4]。电极做功点位于炉料中而非气相空间时,电弧热直接作用于反应物料,热效率明显高于暴露式电弧。炉料比电阻与电极电流密度的匹配程度决定了电阻热在炉料中的分布均匀性,电阻过低则热量集中于电极周围形成局部过烧,电阻过高则电弧难以稳定燃烧。优化电流密度与炉料导电性之间的耦合关系,可使单位电能产生更多有效还原热。

4.2 多电极协同控温能效提升方式

多根电极在炉内形成的热场天然存在叠加与竞争效应,协同控温的要旨在于令各反应区温度场在空间上互补而非相互冲突。各相电极具备独立调节电流与升降位置的能力,操作端可据此对炉内不同区域实施分区温度干预。局部区域温度偏低时增大对应电极功率予以补偿,局部区域出现过热趋势时则主动降功率以遏制无效能耗。功率分配方案应随出渣周期所处阶段做出调整,送电升温期宜将功率集中投放于渣面以下区域以加速熔渣形成,稳产期则倾向于均匀分配功率维持全炉温度场均衡。

4.3 生产过程热能损耗管控优化体系

热能损耗贯穿于炉体散热、烟气排出、冷却水带走热量及炉渣排放四条主要通道。炉体表面散热可通过升级炉衬材料与加厚保温层来削减,高绝热材料能将炉壁外表面温度压低,辐射散热随之减弱。烟气带走的显热占总热损失比重极大,降低排烟温度与减少排烟量是控制该通道损耗的两个抓手。冷却水带走的热量虽然难以完全消除,但通过优化冷却回路设计与降低不必要的冷却流量,可在保证设备安全的前提下回收部分余热。炉渣排放环节的显热管控可从缩短出渣间隔与降低渣温两个维度入手。

4.4 生产工况动态调控能效优化机制

黄磷电炉在一个完整生产周期内经历送电升温、高功率稳产、降功率出渣等多个工况阶段,各阶段的最优电耗水平存在显著差异。动态调控的核心在于让电炉在每一个工况阶段都运行于接近最优的功率—温度区间内。出渣后送电初期采用中低功率可避免炉料冷态承受高热冲击而导致塌料,稳产阶段将功率推至设计上限可最大化单位时间磷产量,出渣前主动降功率可改善渣铁分离效果并减少随后升温所需的额外电能。工况转换节点的功率衔接方式直接影响整个周期的综合电耗水平。

4.5 全生产系统节能运行优化体系构建

单台电炉的能效提升存在物理上限,全系统层面的节能需要将电炉本体、原料预处理、配料输送、冷却循环、炉气回收与尾气处理等子系统纳入统一的能耗管控框架。各子系统的运行参数不应孤立设定,而应以电炉主工艺的实时需求为锚点进行联动调节。配料速率与炉内消耗速率的匹配可避免电极空烧或压料,冷却水量与热负荷的动态对应可消除过量冷却带来的电耗浪费,炉气回收量与导出管负荷的协调可在不影响磷蒸气流速的前提下最大化余热回收率^[5]。

结束语

多电极黄磷电炉的能效提升是一项涉及工艺参数、设备结构与系统运行的综合工程。电极布局与炉料配比的精细调控奠定了高效还原反应的基础,炉体保温与导电系统的结构改进削减了非工艺热损失,而多电极协同控温与全系统联动调节则从运行层面挖掘了节能潜力。各环节的优化并非孤立存在,只有将工艺控制与设备改进统一于系统节能框架之下,才能在现有技术条件下最大限度地降低黄磷生产的综合电耗。

参考文献

- [1] 闫时雨,纪文涛,谢克强,等.水洗—酸浸两步法回收黄磷电尘灰中的镓及浸出动力学[J].有色金属工程,2022,12(3):86-95.
- [2] 陈万初,丁大祥,李坤.电炉法黄磷生产中炉渣热能利用[J].磷肥与复肥,2021,36(10):34-35.
- [3] 陈晨.制磷电炉结构对黄磷生产经济技术指标的影响[J].云南化工,2023,50(10):156-158.
- [4] 徐戴红,伍唐文,王峰,等.入炉物料含水率对热法黄磷生产的影响[J].硫磷设计与粉体工程,2026,190(1):32-34,47.
- [5] 孙志立,牛仁杰,问立宁,李江滔.入炉物料含水量对电热法制磷工艺影响的研究分析[J].肥料与健康,2021,48(6):11-14.