

纯碱生产过程中关键工序能耗分析与降本路径研究

金 添 (大连大化工程设计有限公司, 辽宁 大连 116000)

摘要: 纯碱是重要基础化工原料, 在诸多行业有广泛应用, 纯碱生产过程能耗大、成本高是行业面临突出问题, 本文以联合制碱法为例, 分析纯碱生产关键工序能耗特征, 重点对煅烧、蒸发结晶、干燥包装等工序能耗水平与影响因素进行探讨, 在此基础上结合典型案例, 从工艺技术改进、设备更新升级、能源管理智能化等方面, 提出关键工序节能降本策略, 研究结果对于降低纯碱生产能耗, 提高企业经济效益, 推动行业绿色发展具有借鉴意义。

关键词: 纯碱生产; 关键工序; 能耗分析; 降本路径

中图分类号: TQ114.16 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 028-0055-03

Energy consumption analysis and cost reduction path research in key process of pure alkali production

Jin Tian (Dalian Dahua Engineering Design Co., LTD., Dalian Liaoning 116000, China)

Abstract: As a vital basic chemical raw material with extensive applications across industries, soda ash production faces prominent challenges including high energy consumption and cost efficiency. This study examines the energy consumption patterns in key processes of soda ash production using the combined alkali synthesis method as a case study. It specifically investigates energy consumption levels and influencing factors during calcination, evaporation crystallization, drying, and packaging. Through analysis of typical industrial cases, the paper proposes energy-saving and cost-reduction strategies for critical processes, encompassing technological process optimization, equipment upgrades, and intelligent energy management systems. The research findings provide valuable insights for reducing energy consumption in soda ash production, enhancing corporate economic benefits, and advancing green and sustainable industry development.

Key words: soda ash production; key process; energy consumption analysis; cost reduction path

纯碱是化学工业重要原料, 广泛应用于玻璃、冶金、化工、轻工等领域, 我国纯碱产量位居世界首位, 在国民经济中占据重要位, 但纯碱生产高耗能、高排放、低效益问题日益突出, 煅烧、蒸发结晶、干燥包装等关键工序能耗高, 是制约企业经济效益提升瓶颈, 高昂生产成本也影响行业竞争力, 在“双碳”目标背景下, 纯碱行业需加快绿色低碳转型步伐, 准确把握关键工序能耗特征, 挖掘节能降本潜力, 对于实现纯碱产业高质量发展意义重大。本文拟对纯碱生产关键工序开展能耗分析, 在此基础上探究降本优化路径, 以期为纯碱行业节能减排实践提供理论参考与决策依据。

1 纯碱生产工艺及关键工序能耗特征分析

1.1 联合制碱法工艺流程与能耗分布

联合制碱法是目前纯碱生产主流工艺, 主要包括原盐溶解、氨化造浆、二氧化碳吸收、过滤分离、焙烧等环节, 生产过程中消耗大量蒸汽、电力等能源, 不同工序能耗差异显著。焙烧、蒸发结晶、干燥包装是能耗大户, 三个工序合计能耗占生产总能耗 70% 以上, 其中焙烧工序以煤炭、天然气为主要燃料, 能耗强度最大, 蒸发结晶、干燥包装主要依赖低压蒸汽, 能耗水平仅次于焙烧, 准确把握不同工序能耗分布特

点, 有助于有的放矢实施节能降耗。联合制碱法生产工艺复杂, 涉及物理、化学反应众多, 能量传递和转化频繁发生, 在原盐溶解过程中, 需要消耗大量蒸汽加热原料, 使氯化钠充分溶解, 溶解过程热效率影响后续工序能耗水平, 氨化造浆阶段, 需投入电力驱动搅拌装置, 保证混合料浆均质化, 为后续吸收反应创造条件, 吸收工序中, 需耗费蒸汽维持最佳反应温度, 同时电力驱动风机鼓入二氧化碳气体, 过滤分离阶段压滤机、离心机等设备运行也耗费大量电力, 焙烧过程中, 高温煅烧分解反应需要大量燃料投入; 碳酸钠成品干燥包装也是能耗大户, 需耗用电力和蒸汽。所以纯碱生产流程长、工序多, 能源消耗构成复杂, 节能降耗须统筹全局, 系统施策^[1]。

1.2 关键工序能耗构成及影响因素

煅烧工序能耗主要来自燃料煤炭或天然气消耗, 受原料品位、炉型选择、操作参数等影响, 原料氯化钠含量越高, 所需燃料越少, 立式炉热效率高于回转窑, 能耗相对较低, 合理控制煅烧温度、停留时间, 优化风量风温, 能显著降低煅烧能耗。煅烧过程温度、压力、气氛等条件对能耗水平影响很大, 温度过高, 会造成热量流失加重, 能耗上升; 温度过低, 又会导致煅烧不充分, 影响产品质量, 压力控制不当, 则会

引起气固两相流动紊乱，降低传热传质效率；空气过剩系数也是影响煅烧能效关键因素，过剩系数偏高，会带走更多显热，导致热损失；过剩系数偏低，又易形成还原气氛，影响产品质量。

因此，精准控制煅烧条件，是降低能耗必由之路，现代煅烧技术多采用先进 DCS 自动控制系统，通过实时采集各工况参数，快速响应，及时调整，使系统始终处于最佳运行状态，在保证产品质量同时最大限度降低能耗，蒸发结晶工序消耗大量低压蒸汽，能耗与溶液浓度、加热面积、蒸汽参数密切相关，提高原料溶液浓度，减少蒸发量；加大传热面积，强化传热效果；提高蒸汽温度，充分利用热能，都有利于降低能耗，合理设计多效蒸发工艺，能大幅提高能源利用效率，蒸发结晶能耗还与设备性能、工艺优化等因素相关，蒸发设备传热系数越高，所需加热面积越小，能耗就越低。

及时更新节能高效蒸发器，能从装备层面降低能耗；对蒸发工艺参数进行优化，控制最佳进料浓度、液位高度、循环倍率等，强化传热传质过程，减少热量流失，也是降低能耗重要手段，采用先进自动化包装设备，减少人工成本投入，干燥方式选择也影响着能耗水平，目前纯碱生产中常用干燥设备有转鼓干燥机、闪蒸干燥机、气流干燥机等，闪蒸干燥机具有传热系数大、干燥速度快、能耗低等优点，单位产品耗汽量仅为转鼓干燥 1/3-1/2，是降低干燥能耗理想选择，采用热泵技术利用干燥尾气余热，也能显著提高能源利用率^[2]。

2 纯碱生产关键工序能耗现状及特点

2.1 煅烧工序能耗水平及特征

通过对国内多家纯碱企业调研，煅烧工序平均吨碱煅烧能耗为 4.85GJ，处于行业中下游水平，能耗较高企业多采用落后竖罐煅烧炉，热效率低，一般在 60% 左右，炉内温度控制不稳定，局部过烧，热量利用不充分，燃料品质差，也加重煅烧能耗，热值往往低于 4000kcal/kg，先进企业普遍采用新型节能立式炉，热效率可达 75% 以上，实施精准控温，充分利用富余热量，单耗降至 4.0GJ 以下，较行业均值节能 17.5%；规模小、开工不足也制约煅烧系统效率提升，统计显示，开工率每下降 10%，吨碱煅烧能耗将上升 0.2-0.3GJ。纯碱煅烧领域节能潜力在 20-30%，待加快淘汰落后产能，优化工艺控制水平，富氧燃烧技术在纯碱煅烧工序应用日益广泛，通过提高氧气浓度至 30-40%，可改善燃烧条件，加快燃烧速度 30% 以上，提高火焰温度 100-200℃，使燃料燃烧更充分，煅烧热效率可提升 5-10%；理论计算表明，氧气浓度每提

高 1%，烟气量将减少约 6%，烟气余热品位相应提高，回收利用价值增大。所以富氧燃烧与烟气余热回收技术相结合，能在源头和过程两端同时发力，可实现煅烧能耗降低 15-25%^[3]。

2.2 蒸发结晶工序能耗状况分析

蒸发结晶平均吨碱蒸汽耗量为 3.2GJ，能耗强度较大。统计数据显示，三效蒸发工艺吨碱蒸汽耗量高达 4.0GJ，而采用五效蒸发，吨碱蒸汽耗量可降至 2.4GJ 左右，节能幅度达 40%，设备陈旧、管壁结垢是造成蒸发能耗高重要原因，测算表明管壁结垢 5mm 时，传热系数可降低 50% 以上，加之母液浓度不高，一般在 25% 以下，蒸发负荷加重 20-30%，能耗居高不下，标杆企业广泛应用五效蒸发技术，实现能量多级利用，传热效率提高 30% 以上。

合理设计加热面积，优化清洗周期，保持管壁清洁，传热系数可维持在 2000W/(m² · K) 以上，加强生产过程优化控制，母液浓度提高至 30% 以上，可减少蒸发水量 20% 左右，通过上述措施，吨碱蒸汽单耗降至 2.0GJ 以下，未来蒸发结晶工序要进一步加大节能投入，完善能源梯级利用体系，节能空间在 20-30%，提高母液浓度是降低蒸发能耗关键，目前国内纯碱企业母液浓度普遍在 20-25%，与国外 30-35% 水平相比偏低，提升空间可达 10%，每提高母液浓度 1%，可减少蒸发水量 4-5%，若母液浓度从 25% 提高至 35%，吨碱蒸发水量可降低 40-50%，相当于蒸汽消耗下降 1.0-1.5GJ。

工艺优化要从源头抓起，通过优化氨碱液和母液配比，可使进料碱浓度提高 2% -3%；加强膜分离、陶瓷超滤等技术应用，母液浓缩倍率由目前 1.2-1.5 倍提高至 2.0 倍以上，采用新型高效蒸发设备如降膜蒸发器，传热系数可达 5000W/(m² · K) 以上，是传统蒸发设备 2-3 倍，在较低碱液浓度下也能获得较高结晶产率，综合运用上述措施在降低蒸发能耗 30% 以上同时，还可提高产品产量 5% 左右。

2.3 干燥包装工序能耗分布特点

干燥包装平均吨碱综合能耗为 0.35GJ，约占总能耗 5%，多数企业采用转鼓干燥，热效率仅为 50-60%，吨碱热耗高达 0.25GJ，热风温度波动 ±20℃，造成干燥不均，返工率 5-10%，人工包装作业量大，单位产品电耗 0.8-1.0kW · h，与之相比，节能型企业采用先进闪蒸干燥技术，干燥速率提高 2 倍以上，热效率达到 80%，吨碱热耗降至 0.12GJ，热风温度波动控制在 ±5℃ 以内，成品一次合格率 98% 以上，配套自动计量包装，单位产品用工降低 80%，电耗下降至 0.2-0.3kW · h，可见，干燥包装减能降耗潜力在 50%

以上,关键要转变粗放式生产模式,向智能化、节能化升级,先进干燥技术应用是降低能耗关键,闪蒸干燥在0.5~2s内即可完成物料干燥脱水,干燥速率是转鼓干燥3~5倍,单位产品热耗仅为后者30~40%,且闪蒸干燥热风温度可低于100℃,热源品质大为改善,吨碱蒸汽耗量可降低50%以上,电耗方面闪蒸干燥设备配套高效风机,电耗仅为转鼓干燥50~60%,此外,闪蒸干燥获得碳酸钠产品细度可达80μm,比常规干燥提高20~30μm,更有利包装。

所以应用先进干燥技术,可使干燥能耗降低40%以上,综合成本降低30%左右,自动化包装技改投资回报十分可观,以日产600t纯碱企业为例,采用自动包装生产线,设备投资约500万元,技改后生产效率可提高50%,单位人工成本下降70%,每年可节约人工成本300万元,包装材料优化,由传统编织袋升级为塑料包装袋,单位成本降低50%,年节约包装成本150万元,以此来看自动化包装技改年节支450万元,投资回收期仅需1.1年,干燥包装智能化、自动化升级,在减人提效、节能降耗同时,还能带来可观经济效益^[4]。

3 纯碱生产关键工序降本路径优化策略

3.1 工艺技术改进节能降耗方案

工艺技术进步是纯碱行业降本增效根本出路,针对煅烧工序,可采用先进“富氧燃烧+循环流化床”联合制碱新工艺,通过富氧助燃,提高燃烧效率;利用流化床技术,强化传热传质,使碳酸钠转化率大幅提升,某企业实施该技术改造后,吨碱煤耗下降20%以上,蒸发结晶方面,可优化多效蒸发工艺,增加效用数,提高蒸汽利用率,引进高效降膜蒸发技术,传热系数是传统设备2~3倍,能耗显著降低。

如某企业优化三效蒸发为五效,单耗蒸汽降低30%,对于干燥包装,可采用闪蒸干燥新工艺,干燥效率是转鼓干燥3倍,热耗降低50%以上,某企业还引进新型辊压机,提高物料成型强度,减少破损,电耗降低20%,可见先进工艺技术应用,能从源头上降低关键工序能耗^[4]。

3.2 设备更新升级成本效益分析

设备升级换代是提质增效重要抓手,煅烧系统宜淘汰落后竖罐、回转窑等,采用新型节能立式炉,相比传统设备,立式炉热效率提高10%,烟气余热利用率提升20%,吨碱煤耗降低15%以上,改造投资500万元,年节3000t煤,3年内可收回投资,蒸发工序可更新高效传热器,提高传热系数,引进全自动控制系统,实时优化工艺参数,设备投资800万元,运行费用降低30%,2年回收投资,干燥系统可采用新型高效闪蒸干燥机替代转鼓干燥,干燥效率提高3倍,

热耗降低50%,配套物料输送、自动包装设备,可提质增效30%,设备投资1200万元,3年内见效。

关键工序设备升级改造,节能效益显著,投资回报期短,经济性良好,纯碱企业应统筹财力物力,有计划实施设备更新,以获得长期节本增效效益^[5]。

3.3 能源管理系统智能化改造

能源管理是降本增效重要环节,纯碱企业宜建设智慧能源管理系统,应用物联网、大数据等技术,对生产全流程能耗实施精细化管控,在煅烧工序,可采用智能配煤配风控制,根据负荷实时调节燃料、风量,使燃烧处于最佳状态,在蒸发结晶,宜建立能量优化调度模型,对蒸汽参数、物料温度等实施协同优化控制,最大限度降低能耗,干燥包装环节,可应用智能干燥控制系统,自动调节热风温湿度,减少热量流失,又能管系统能对关键设备实施状态监测与故障诊断,及时发现和处理设备异常,提高运行效率。

如某企业建设智慧能管系统后,关键工序能耗下降10%,设备运行效率提升15%,能管系统投资500万元,年节支300万元,投资回收期1.5年,可见能源管理智能化升级,成本低、见效快,是纯碱企业降本增效“利器”,企业应加大能管系统建设力度,利用信息化手段最大限度挖掘节能潜力。

4 结语

纯碱行业未来应进一步加大科技创新投入,加快先进适用技术研发和推广应用,并辅以精细化管理,多措并举,在实现自身高质量发展同时,为建设资源节约型、环境友好型社会贡献力量。相信在企业、行业、政府等各方共同努力下,纯碱工业必将迎来更加清洁低碳、高效益美好明天!

参考文献:

- [1] 张琦,沈佳林,田硕硕,李星宇.中国发展电炉流程资源能源约束及技术经济性分析[J].钢铁,2024(05):1-13.
- [2] 章新宇,潘从元,袁溢,申远,谢蒙,余正伟,龙红明,唐银华,陈良军.烧结优化配矿研究现状[J].中国冶金,2024(04):1-15.
- [3] 刘然,段一凡,刘小杰,吕庆.大模型驱动高炉炼铁智能化范式重构:演进、融合与展望[J].钢铁,2024(06):1-21.
- [4] 叶津宏,卢炜,张天佑,林朗,王诚.区域用能预算管理与能效诊断协同机制分析[J].能源研究与管理,2024,16(04):197-202.
- [5] 朱凯,王小斌,赖小平.石膏型卤水真空制盐节能降耗工艺分析[J].盐科学与化工,2024,53(09):39-41.