

水煤浆浓度优化对气化效率及生产成本的影响研究

陈红林 (江苏索普化工股份有限公司, 江苏 镇江 212006)

摘要: 本文研究了水煤浆浓度对气化效率以及生产成本的影响。研究发现, 对浆体制备、输送至气化全流程进行精确控制, 将浆体浓度从常规的 58% ~ 60% 提高到 62% ~ 65% 的优化区间, 可以明显提高气化效率。联泓化学通过滚筒筛等改造, 使煤浆浓度提高到 62.43%, 有效气含量达到 85.25%, 年经济效益达数百万元。同时优化后原料煤耗可降低 3% ~ 5%, 吨合成气成本下降 30 ~ 50 元, 有利于降低单位产品的碳排放强度, 为水煤浆气化技术的节能降耗、降本增效提供依据。

关键词: 水煤浆浓度; 气化效率; 生产成本; 碳转化率; 系统能效

中图分类号: TQ536 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0073-03

Study on the Influence of Optimizing Water-coal Slurry Concentration on Gasification Efficiency and Production Costs

Chen Honglin (Jiangsu SOPO Chemical Co., Ltd. Zhenjiang Jiangsu 212006, China)

Abstract: This research examines the impact of optimizing water-coal slurry concentration on the efficiency of gasification and production expenses. The study shows that exercising precise control over the entire process—from preparing the slurry to carrying out gasification—can greatly boost gasification efficiency. This is achieved by raising the slurry concentration from the typical range of 58% - 60% to an optimized range of 62% - 65%. Take Lianhong Chemical as an example. By making modifications such as drum screens, it achieved a coal slurry concentration of 62.43% and an effective gas content of 85.25%, creating annual economic benefits amounting to millions of yuan. At the same time, the optimized processes cut raw coal consumption by 3% to 5%, decrease the cost of synthetic gas per ton by 30 to 50 yuan, and contribute to reducing the carbon emission intensity per unit of product. These results offer vital evidence for conserving energy, reducing costs, and enhancing efficiency in water-coal slurry gasification technology.

Keywords: coal-water slurry concentration; gasification efficiency; production cost; carbon conversion rate; system energy efficiency

在当前工业发展背景下, 随着能源与环境问题日益突出, 水煤浆气化作为煤化工产业的关键环节, 其运行效率与成本控制对行业可持续发展至关重要。水煤浆浓度是气化工艺的核心操作参数, 直接影响气化炉反应效率、合成气质量及整体能源转化水平。浓度过低会导致反应不充分、有效气成分下降, 并增加系统氧耗与煤耗; 浓度过高则易引发输送困难、雾化效果差及炉内结渣等问题, 从而提高运行维护成本。因此, 系统优化水煤浆浓度已成为提升气化综合性能、实现节能降耗与降本增效的重要研究方向 [1]。本文旨在探究水煤浆浓度对气化效率与生产成本的耦合影响机制, 从浓度调控与气化指标的内在关联出发, 提出科学合理的浓度优化策略, 为煤化工企业绿色、高效、低成本运行提供理论依据与实践参考。

水煤浆浓度优化并非孤立操作, 而与煤种特性、磨矿工艺、添加剂配方及气化炉型等密切相关。早期技术受限于设备与检测手段, 浓度多维持在 58% - 60%。随着材料、流体力学及自动控制技术的发展, 高精度在线浓度计与粘度仪的应用为浓度提升提供了实时调控保障。不同煤种成浆性差异显著, 低阶煤因

含水量高、含氧官能团多, 成浆浓度往往偏低, 需通过配煤、添加剂复配或预处理工艺加以改善。浓度优化须以煤质分析与工艺适配为基础, 实现从粗放调控向精细匹配的转变。未来, 随着人工智能与大数据技术的融合, 浓度优化将进一步与智能制浆、数字孪生气化炉相结合, 实现动态寻优与预测性调控, 推动气化过程向更高效、更低碳的方向发展。

1 水煤浆浓度优化对气化效率的影响路径

1.1 基于气化反应特性的浓度调控技术

水煤浆浓度优化要实现物料流动、热力学条件和化学反应的有效配合。传统工艺由于浓度控制不好, 造成碳转化率低。使用先进的制浆技术加上在线检测, 可精确控制浆体粒度和流变性, 进而改善炉内雾化和反应。根据气化炉型和操作条件, 对浓度对反应温度、氢碳比、甲烷含量的影响规律进行分析。适当提高浓度有利于提高碳转化率和冷煤气效率, 但是也要考虑它对耐火材料侵蚀和运行稳定性的影响。数值模拟和实验相结合可以进一步揭示传质、传热、反应动力学机理, 为浓度调控提供依据 [2]。

从反应工程的角度来说, 水煤浆浓度的提高实际

上就是降低单位碳负载的水分含量，从而减少气化过程中水分蒸发所需要的潜热。从研究结果可知，浓度每增加1%，气化反应温度就会上升10~15℃，不但加快了碳和氧气、水蒸气的反应速度，而且有利于甲烷重整、水煤气变换等二次反应的发生，从而提高有效气(CO+H₂)的产率。高浓度浆体由于粘度增大，会使得雾化粒径分布发生改变，从而影响气液固三相接触效率。为此，现代气化炉一般采用多级雾化喷嘴和气流协同控制技术，保证高浓度浆体仍能实现均匀雾化。如某企业利用计算流体力学(CFD)模拟对喷嘴结构进行优化，在浓度提高到63%的时候，雾化粒径中值(D50)仍然保持在80μm以下，碳转化率一直维持在99%以上。也说明浓度优化要和雾化工艺、炉内流场设计同步进行，才能使气化效率得到整体提升。

1.2 浆体制备、输送系统的优化与能耗协同管控

浆体的制备、输送以及动力能耗管理，是决定整个气化效率和成本的重要因素。现代高效技术体现在针对性的设计以及运行控制上。硬件上使用耐磨耐蚀材料，改进管道和喷嘴结构，装设在线调压和精准控制装置，减少能量损耗和堵管风险。集成实时浓度、黏度监测，在负荷、煤种发生变化时对制浆参数做动态调整，使浆体保持最优状态后进入气化。采用多级研磨、粒度控制、添加剂精确加入的方式可以改善浆体的成浆性及反应活性，结合废热回收可以进一步降低系统的能耗。

软件管控中动力能耗的科学管理对于成本控制来说十分重要。核心就是建立制备、输送和气化三个环节的能源监测与调节系统。依靠高精度传感器和能源管理系统，实时监测高压料浆泵、磨煤机等重要设备的功耗和流量来支撑能效评价。在此基础上，根据浓度、黏度等物性参数建立动态能耗模型，找到不同浓度下能耗的特点，确定高耗能的环节。浓度提高会增加输送阻力，此时可以采用改变添加剂或者优化粒径分布的方法，在保持高效气化的同时控制能耗。另外，加入以负荷响应为基础的智能控制系统，可以自动调节泵频等参数，使系统高效运行。设备优化、能耗管控软硬结合的方式实现了能源精细化管理，给浓度优化提供重要的支撑。

2 水煤浆浓度优化对气化效率与生产成本的耦合影响分析

2.1 基于浓度调控的直接工艺效益评估

通过调节水煤浆的浓度，提高水煤浆气化工艺中生产过程的清洁化程度和效率，是减少环境负荷和降低运营成本的关键手段。该策略目的在于提高碳转化率和合成气品质，从源头上减少灰渣的产生和污染物的排放，

降低氧耗和煤耗以达到经济效益增长的目的。浓度的优化贯穿制浆、气化、净化的全部过程。以联泓(山东)化学有限公司的实践为例，公司通过扩能改造制浆核心设备——湿式棒磨机一级滚筒筛，在不明显增加投资和运行成本的前提下，使平均煤浆浓度由原来的61.95%提高到现在的62.43%^[3]。该浓度优化措施加上磨机钢棒级配调整等辅助手段，直接提高了气化效率。从数据可以看出，公司气化装置改造之后，年度平均有效气(CO+H₂)含量从84.34%提高到85.25%，合成气品质明显提高。这说明对制浆环节有针对性的设备改造，是提高煤浆浓度、从而提高气化直接工艺效益的有效途径。在气化反应阶段，高浓度浆体意味着带入炉内的无效水分少，反应热利用率高，可以提高碳转化率、降低比氧耗和比煤耗。从联泓化学的案例可知，对制备过程进行精确改进，可以使浆体浓度提高到62%~65%，直接提高有效气产率，降低原料消耗^[4]。

表1 高浓度水煤浆运行效益案例(以联泓化学改造为例)

项目	内容描述	典型数据
煤浆浓度提升	一级滚筒筛等改造后平均浓度提升	61.95% → 62.43%
有效气成分优化	CO+H ₂ 平均体积分数增加幅度	84.34% → 85.25% (提升约0.91个百分点)
运行周期	优化后气化炉最长稳定运行周期	130天
经济效益	煤浆提浓产生的年化效益(公司评估)	约350万元

除联泓化学外，国内其他多家煤化工企业也通过浓度优化获得较大收益。陕西某煤制烯烃项目改进磨煤系统，使用高效分散剂，水煤浆浓度由原来的60.2%提高到63.5%，有效气含量由原来的83.1%提高到86.0%，吨合成气煤耗降低约4.2%，年节约原料煤3万t以上。河南某化肥企业通过粒度分级和添加剂复配，使浓度达到64%的同时保持粘度低于1200MPa·s，气化炉连续运行周期由90天延长到150天，年维修成本降低200万元以上。浓度优化不能只是单一参数的变化，而要制浆工艺、添加剂技术、设备改造和运行维护的综合。另外，随着浓度的提高，气化炉渣中残碳含量一般会降低，碳转化率提高，气化渣资源化利用(建材原料、土壤改良剂)的条件更好，形成了气化、环保、资源化良性循环。

2.2 系统能效集成与副产物资源化的协同效益

在直接工艺效益之外，系统能效集成技术和副产物资源化所形成的协同效益，又把浓度优化的经济价值放大了。在水煤浆气化装置中，废热回收以及能量梯级利用属于削减运行成本的关键技术途径。联泓化学的实践提供了具体的范例：该公司针对气化除水系统闪蒸蒸汽过剩的问题，实施了气化除氧器蒸汽回收

改造。将原来放空的 0.3MPa 闪蒸蒸汽回收，用作变换工段汽提塔的加热蒸汽，代替原来的 0.3MPa 新鲜蒸汽。改造后每小时可节约蒸汽 6.5 ~ 7t，节能效果明显，在获得巨大的经济效益的同时也改善了现场环境。这就充分说明，在浓度优化提高主工艺效率的基础上，对全系统能量流进行集成优化，可以发掘更深层次的节能潜力。同时，气化装置运行稳定、长期运行是保证一切优化效益的前提。联泓化学通过对气化炉拱顶 K 砖和 M7 砖的结构进行优化改造，解决了该部位易烧蚀的问题，把运行周期从约 4500h 延长到 6000h 以上，提高了气化炉开工率，降低了非计划停车风险和维护成本。另外该公司还进行了高压煤浆泵扩缸改造，增大活塞直径，在高产能的情况下以较低的转速运行泵体，提高设备可靠性，保证高浓度煤浆稳定输送。围绕核心设备稳定性、可靠性、能效的综合技术改造与浓度优化主策略相互配合，共同形成了提高系统整体能效和经济性的坚实基础^[5]。

3 政策引导与浓度优化技术的互动发展

近些年来，在“双碳”战略目标的引领之下，国家对于煤化工行业绿色转型的政策体系日渐完备，诸多政策直接推动并支撑着水煤浆浓度优化技术的研发与应用。相关部门发布的高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022 年版）的通知（发改产业〔2022〕200 号）等专项政策，把改善水煤浆浓度、提高气化效率当作削减碳排放强度的重要技术途径^[6]。这些政策既设立了气化装置的能效基准、标杆水平，又用专项补贴、绿色信贷等经济手段促使企业进行以浓度参数优化为主的技术改造。对采用高浓度水煤浆技术，碳转化率大于 99% 的示范项目，给予设备投资一定比例的财政补贴，有效降低了企业技改门槛。更直接的，政策上不断加强监管，把与本研究紧密相关的核心指标如单位合成气综合能耗、碳转化率等纳入全国碳排放权交易体系核算范围。这种激励和约束并重的导向使浓度优化带来的能效提升、碳减排量可以直接转化为企业的碳资产或者避免超额排放的成本，大大加快了高浓度水煤浆技术的产业化进程。企业层面的联泓化学通过一系列改造来实现煤浆提浓、节能减排和稳定运行，就是在这样的政策环境下追求技术进步和成本控制的体现。国家成立产学研平台，主要对浓度—黏度协同调控等关键技术进行攻关，给浓度优化提供不断的技术支持。因此政策环境和浓度优化技术已经形成了一个互相促进、互相发展的局面^[7]。

从国际上看，欧美日等发达国家早在 21 世纪初就已把水煤浆浓度当作气化性能的重要指标之一，用立法、税收优惠等方式推动技术更新。美国能源部

(DOE) 在“清洁煤技术计划”中资助了多项高浓度水煤浆 (>65%) 的中试和示范项目，以降低 IGCC 发电的碳强度。欧盟则用“排放交易体系 (EU-ETS)”把气化单元的碳转化率与配额分配联系起来，间接促使企业改善浆体浓度。我国在“十四五”期间先后发布了《现代煤化工行业节能降碳改造行动计划》等文件，将水煤浆浓度 $\geq 62\%$ 作为新建气化装置的推荐指标，并对改造项目给予最高 15% 的设备投资补贴。这些政策不但是企业技改的经济门槛降低，而且通过标准引领促使行业技术升级。随着碳关税 (CBAM) 等国际规则的实行，水煤浆浓度优化所带来碳减排效益将会进一步转变为国际贸易竞争力，促使我国煤化工企业由“被动合规”转成“主动提质”，在低碳化工产业链中占据更有利的位置。

4 研究结论与行业展望

水煤浆浓度优化属于改善气化效率，缩减生产成本的重要技术途径。利用建立起来的浓度、粘度、气化效率三者之间的协同模型，对制浆和输送系统进行精准改造，可以提高碳转化率以及有效气的成分。如案例所示，当浓度达到 62% ~ 65% 的时候，可以得到明显的经济效益和环境效益。未来浓度优化技术会朝着智能化调控、煤质适应性匹配、多联产系统协同等方向发展。因此水煤浆浓度优化不但是提高单套装置运行效益的有效途径，也是在政策、市场推动下，推动煤化工行业绿色低碳转型的重要技术支撑。

参考文献：

- [1] 孙华峰, 牛福生, 周营, 等. 基于机械解离活化的气化细渣炭灰分离浮选过程强化研究 [J]. 金属矿山, 2024(8):93-99.
- [2] 赵强, 杜常宗, 卢宇飞, 等. CFB 锅炉掺烧水煤浆气化细渣的研究和运行分析 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1):305.
- [3] 张晓东. 浅谈氨压缩制冷系统紧急切断阀优化 [J]. 流程工业, 2025(11).
- [4] 易同生, 秦勇, 周永峰, 等. 煤炭地下气化项目技术经济评价研究进展述评 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7):1-16.
- [5] 高增林, 张乾, 高晨明, 等. 水煤浆煤气化粗渣水流分级提炭分质 [J]. 化工进展, 2024, 43(3):1576-1583.
- [6] 国家发展改革委等四部门印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南 (2022 年版)》[J]. 上海节能, 2022,(07):941.
- [7] 张浩儒, 张国强, 余建豪, 等. 煤气化特性优化及低碳联合循环发电系统集成研究 [J]. 热力发电, 2024(7).