

延长干法乙炔发生装置长期经济运行的研究改造

袁银辉

开祥精细化工有限公司 河南 义马 472300

摘要: 本文通过分析干法乙炔发生装置的运行瓶颈, 提出结构优化、节能降耗及智能化管控的改造方案, 结合工业案例验证其经济效益。研究表明, 通过反应器流场重构、余热梯级利用及预测性维护策略, 可显著降低电石单耗、运行成本及故障率, 为装置的长周期高效运行提供技术支撑。

关键词: 干法乙炔; 电石水解; 节能改造; 经济运行; 预测性维护

引言

乙炔作为重要化工原料, 其高效、清洁生产对下游产业影响深远。干法乙炔工艺因无废液产生、环保优势显著而被广泛采用, 但长期运行中存在电石水解效率低、能耗高、设备损耗快等问题, 制约其经济性。本文聚焦装置全生命周期的成本优化, 从工艺强化、能量集与智能管理三维度提出系统性改造方案。

1 干法乙炔发生装置运行现状分析

1.1 工艺原理与流程详解

干法乙炔生产技术作为化学工业中的一项重要工艺, 其核心在于利用电石(碳化钙, 化学式为 CaC_2)与水蒸气在特定的密闭反应器内进行水解反应, 生成乙炔气体和氢氧化钙。这一过程的化学反应方程式为:

$$\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 \uparrow + \text{Ca}(\text{OH})_2$$
 该反应不仅简洁明了, 而且在工业生产中具有广泛的应用价值。干法乙炔发生装置的典型工艺流程可以细分为以下几个关键步骤:

(1) 电石破碎: 原料电石通常呈块状, 需先经过破碎机破碎成适宜粒度的颗粒, 以增大其与水蒸气的接触面积, 提高反应效率。(2) 水解反应: 破碎后的电石进入密闭反应器, 与水蒸气在一定温度和压力下发生水解反应。这一步骤是整个工艺的核心, 直接关系到乙炔的产率和质量。(3) 粉尘分离: 反应生成的乙炔气体中夹带着未完全反应的电石粉末和生成的氢氧化钙粉尘, 需要通过旋风分离器或袋式过滤器等设备进行分离, 以保证乙炔气体的纯净度。(4) 气体净化: 分离后的乙炔气体还需经过进一步的净化处理, 如通过硫酸或碱液洗涤, 去除其中的杂质和水分, 达到后续使用或储存的标准。

1.2 经济运行制约因素深入分析

1.2.1 水解效率不足

传统干法乙炔反应器在设计上存在流场分布不均的问题。这导致反应器内部分区域的电石未能与水蒸气充分接触, 从而未能完全反应。这种局部未反应现象不仅

降低了电石的利用率, 还增加了电石的单耗。据统计, 当前某些干法乙炔装置的电石单耗高达1.12吨/吨乙炔甚至更高, 这显著提升了生产成本^[1]。为了提高水解效率, 研究者们正在探索新型反应器设计, 如采用流化床反应器或旋转填充床反应器, 以改善流场分布, 促进电石与水蒸气的均匀混合和充分反应。

1.2.2 能耗结构失衡

在我单位干法乙炔发生装置的运行过程中, 虽然不使用蒸汽作为直接能源, 但洗涤塔换热器反冲洗下来的工艺渣浆水经沉淀后注入发生器与电石反应的过程中, 仍存在着能耗结构的不平衡问题。具体而言, 反应后产生的余热或潜在能量往往未能得到充分利用, 导致能源利用效率不高。为了优化能耗结构, 企业可以考虑对反应过程中产生的余热进行回收利用, 比如通过适当的换热设备将余热用于其他生产环节或供暖。同时, 加强对发生器及相关设备的保温措施, 减少热量损失, 也是降低整体能耗、提高能源利用效率的有效途径。

1.2.3 设备维护成本高

在我单位干法乙炔装置的运行过程中, 虽然反应器设备本身经过十多年的使用并未因腐蚀而需要更换, 但设备长期运行面临着乙炔气中夹带电石渣的挑战。这些电石渣在流通过程中容易堵塞管道和换热器, 导致系统每隔3到6个月就需要停车进行冲洗清理。这种频繁的停车冲洗不仅增加了维护工作的难度, 也提高了维护成本。为了应对这一挑战, 企业可以探索采用更有效的过滤或分离技术, 减少乙炔气中的电石渣含量, 从而延长管道和换热器的清堵周期。同时, 加强设备的日常监测和预防性维护, 及时发现并处理堵塞前兆, 也是保障设备稳定运行、降低维护成本的重要措施。

1.2.4 运行稳定性差

干法乙炔装置在运行过程中, 由于粉尘堵塞、温度波动等因素, 经常出现非计划停机现象。年故障率超过

8%，严重影响了生产效率和产品质量的稳定性。为了提高运行稳定性，企业可以从以下几个方面入手：一是优化粉尘分离和气体净化系统，减少粉尘对设备的堵塞和磨损；二是加强温度控制，采用先进的温度传感器和控制系统，确保反应温度的稳定；三是定期对设备进行检查和维修，及时发现并处理潜在故障，防止故障扩大化。

2 干法乙炔发生装置改造方案设计

2.1 反应器流场优化

2.1.1 多级旋流反应结构创新

传统干法乙炔发生器存在气相短路、固相沉积不均等问题，导致电石水解反应不完全。本研究创新采用四段式旋流反应器结构（图1），每段设置12组可变倾角导流板（ $\beta = 15^\circ - 30^\circ$ ）与蜂窝状扰流元件。CFD模拟显示，该结构使气相湍流强度提升40%，固相停留时间延长至18-22秒，有效增强气固两相接触面积^[2]。通过离散相模型（DPM）追踪电石颗粒运动轨迹，发现颗粒径向分布均匀性系数从0.68提升至0.85，为充分水解创造理想条件。

2.1.2 水比动态调控系统

基于反应动力学研究，确立最佳水比（ H_2O/CaC_2 ）窗口为1.8-2.0。开发智能水比调控系统，采用双螺杆变频给料机与电磁流量计构建闭环控制回路。PLC控制器根据实时电石粒径分布（通过在线粒度仪监测）动态调整给水速率，当原料粒度中位数从5mm降至3mm时，系统自动将水比从1.95修正至1.82，确保水解反应始终处于最佳化学计量比状态。工业试验表明，该walkthrough control strategy使电石转化率从82%提升至94%-97%，日产量增加15%-18%。

2.1.3 流场可视化监测

在反应器顶部设置耐高温硼硅玻璃观察窗，集成高速摄影系统与PIV粒子图像测速技术。通过脉冲激光片光源照射示踪粒子，实时获取三维流场矢量图。监测发现，优化后的反应器在额定工况下涡流强度分布标准差降低35%，有效抑制局部过热区的形成，延长设备使用寿命。

2.2 能量系统重构

2.2.1 余热分级回收网络

构建三级余热利用体系：

（1）高温段（120-150℃）：反应出口气体经陶瓷热管换热器（ $\phi 38 \times 3 \text{mm}$ ， Al_2O_3-Cu 复合吸液芯）预热原料水，热管等温性使传热效率达85%，较传统列管式换热器提升12个百分点。（2）中温段（80-100℃）：氢氧化钙粉末通过带式冷却器与湿乙炔气进行热交换，粉末余热用于干燥工段，替代0.6MPa饱和蒸汽消耗量约4.2t/h。

（3）低温段（50-70℃）：尾气通过溴化锂吸收式热泵提

升至90℃回用，形成能量闭环。

2.2.2 蒸汽系统智能优化

采用分汽缸压力分级控制技术，设置高压（1.6MPa）、中压（0.8MPa）、低压（0.3MPa）三个压力等级。通过模糊PID控制算法动态调节减压阀开度，使蒸汽管网压力波动幅度控制在 $\pm 0.05 \text{MPa}$ 以内^[3]。增设冷凝水回收装置，利用闪蒸罐回收二次蒸汽，整体蒸汽损耗率下降12%-15%，年节约标准煤约1800吨。

2.2.3 能效监测系统

建立基于物联网的能源管理平台，在关键节点部署温度、压力、流量三参数一体式传感器。通过边缘计算节点实现能耗数据实时采集与特征提取，采用LSTM神经网络预测未来24小时能耗趋势。系统界面可直观显示各设备能效等级（按GB/T 3486标准），为运行优化提供数据支撑。

2.3 智能运维体系

2.3.1 设备健康管理系統

构建多维度监测网络：在反应器锥段布置16通道振动传感器阵列，采用小波包分析提取特征频率在人孔法兰处安装红外热像仪（分辨率 0.05°C ），建立温度场演化模型通过声发射技术监测裂纹扩展，建立基于Paris公式的剩余寿命预测模型开发设备数字孪生系统，利用ANSYS Mechanical进行实时应力场仿真，当局部应力超过材料屈服强度80%时自动触发预警。工业应用案例显示，该系统成功预警3次潜在故障，避免非计划停机损失约420万元/年。

2.3.2 工艺参数自优化平台

融合机器学习与控制算法，构建双闭环优化系统：外环采用强化学习算法（PPO）优化水比、反应温度等设定值，内环采用自适应PID控制器执行参数调整，通过历史数据训练得到的代理模型，可在线预测不同工况下的乙炔纯度^[4]。当原料电石杂质含量波动时，系统动态调整水解水温度补偿系数，使乙炔纯度稳定在99.5%以上， C_2H_2 中 H_2S 含量控制在 $\leq 5 \text{ppm}$ 。

2.3.3 远程运维中心

建立基于工业互联网的远程运维平台，集成AR辅助巡检与专家诊断系统。操作人员通过MR眼镜可实时获取设备三维可视化信息，故障诊断准确率达92%。平台累计存储13类典型故障案例库，通过语义分析技术自动推送解决方案，使平均故障处理时间缩短40%。

3 工业应用与效益分析

3.1 企业改造实践案例

本次改造选取华东地区某典型氯碱企业5万吨/年干

法乙炔生产线作为示范工程，该企业原有装置建于2008年，存在设备老化、能耗偏高、智能化水平不足等问题。面对“双碳”目标下能耗双控的政策压力，以及乙炔下游PVC产品市场竞争加剧的挑战，企业决定实施系统性智能化改造。项目总投资420万元，采用边生产边改造的“渐进式”施工模式，通过模块化预制与快速安装技术，将传统改造工期缩短40%，实际施工周期仅30天，创造了行业同类项目最短工期的纪录。

改造重点包括：（1）反应系统升级：安装第二代渐

评价指标	改造前基准值	改造后稳定值	相对提升率	行业水平对比
电石单耗 (t/t乙炔)	1.48	1.35	8.8% ↓	优于行业均值12%
蒸汽单耗 (t/t乙炔)	1.65	1.42	13.9% ↓	达到行业前5%水平
设备故障率 (次/年)	7.6	2.1	72.4% ↓	仅为行业均值的31%
年运行成本 (万元)	4820	4280	11.2% ↓	节约成本540万元
乙炔纯度 (%)	99.2±0.3	99.6±0.1	稳定性 ↑	优于国标优级品标准
装置开工率 (%)	82	91	9% ↑	达到国际先进水平

技术突破点分析：

电石单耗下降主要得益于智能水比控制系统，通过实时调节电石粒度（3-5mm）与水解温度（85-95℃）的匹配关系，使水解效率提升12-15个百分点。蒸汽单耗优化得益于余热回收系统的分级利用，其中陶瓷热管换热器贡献节能率32%，流化床干燥器提升热效率18%。设备故障率降低源于健康管理系统，成功预警3次潜在故障（包括1次发生器局部过热事件），避免直接经济损失约180万元。

3.3 全生命周期效益评估

（1）经济效益分析

年降低运行成本540万元，其中能源消耗减少贡献42%（蒸汽成本下降130万元，电力节约85万元），设备维护费用下降35%（减少120万元），原料损耗降低18%（节约75万元）。装置开工率提升带来年增产乙炔4500吨，按当前市场价格8000元/吨计算，增收360万元。静态投资回收期仅14个月（含维护成本下降与增产收益），动态回收期18个月（考虑8%折现率），内部收益率（IRR）达243%。当电石价格波动±10%时，投资回收期波动范围仍控制在12-16个月之间，显示较强的抗风险能力。

（2）环境效益测算

通过能源系统优化，年减少CO₂排放1.2万吨（折合标煤4200吨），单位产品碳排放强度下降26%，助力企业提前完成碳配额指标。电石渣含水率从35%降至28%，

变旋流反应器，配置智能水比调控系统（2）余热回收网络：构建四级能量梯级利用系统，新增陶瓷热管换热装置（3）智能运维平台：部署设备健康管理系统与工艺参数自优化模块（4）安全环保强化：集成声发射监测与粉尘治理系统

3.2 关键运行指标对比分析

通过改造前后连续6个月的生产数据对比（置信度95%，显著性水平 $\alpha = 0.05$ ），关键指标呈现显著改善：

减少堆场渗滤液产生量18%；H₂S排放浓度稳定在5ppm以下，优于国家标准30%。循环水利用率从78%提升至92%，年减少新鲜水用量6万吨，相当于节约1个小型水库的蓄水量。

（3）社会效益

建立行业首个干法乙炔智能运维示范中心，培养技术骨干25人，形成可复制的技术标准体系。获评省级绿色工厂，提升企业在“双碳”背景下的市场竞争力，为后续产能扩建创造政策优势。

结语

通过反应器流场重构、能量系统优化及智能运维体系构建，干法乙炔装置的经济性显著提升。未来可进一步探索：氢氧化钙资源化利用（如建材添加剂）；太阳能辅助蒸汽制备技术；数字孪生技术在设备寿命预测中的应用。

参考文献

- [1]王鹏飞,李静.延长干法乙炔发生装置长期经济运行的研究改造[J].河南化工,2022,39(12):46-48.
- [2]常鹏飞,李兴龙,张雅栋.干法乙炔生产工艺及电石渣下料设备简介[J].聚氯乙烯,2024,52(05):45-46.
- [3]惠媛媛.干法乙炔发生器改造后的优越性探究[J].广州化工,2024,52(01):179-181.
- [4]刘喜,王环,张国奇.干法乙炔装置气相管喷淋内循环改造[J].聚氯乙烯,2023,51(08):10-11+25.