

# 硫磺回收工艺优化对经济效益的影响研究

田旺博 (中国石化海南炼油化工有限公司, 海南 洋浦 578001)

**摘要:** 本文聚焦硫磺回收工艺优化对经济效益的影响。通过剖析硫磺回收工艺的常见类型及现状, 提出了涵盖工艺参数优化、催化剂改进和设备升级改造等方面的优化策略。从成本指标和收益指标构建经济效益评估体系, 并运用净现值法、内部收益率法和投资回收期法进行评估。研究表明, 工艺优化后, 原料利用率提高, 能耗和设备维护成本降低, 硫磺产量与质量提升, 综合经济效益显著提升, 为企业工艺改进决策提供依据。

**关键词:** 硫磺回收工艺; 优化; 经济效益; 影响

中图分类号: TQ125.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0073-03

## Research on the Impact of Sulfur Recovery Process Optimization on Economic Benefits

Tian Wangbo (China Petrochemical Hainan Refining & Chemical Co., Ltd., Yangpu Hainan 578001, China)

**Abstract:** This paper focuses on the impact of sulfur recovery process optimization on economic benefits. By analyzing the common types and current status of sulfur recovery processes, optimization strategies are proposed, covering process parameter optimization, catalyst improvement, and equipment upgrading. An economic benefit evaluation system is constructed based on cost indicators and revenue indicators, and assessed using the net present value method, internal rate of return method, and investment payback period method. The study shows that after process optimization, raw material utilization rate increases, energy consumption and equipment maintenance costs decrease, sulfur production and quality improve, and comprehensive economic benefits significantly enhance, providing a basis for process improvement decisions in enterprises.

**Keywords:** sulfur recovery process; optimization; economic benefits; impact

随着环保法规日益严格和市场竞争的加剧, 对硫磺回收工艺进行优化升级迫在眉睫。本文旨在研究硫磺回收工艺优化策略及其对经济效益的影响。通过对工艺参数的精准调控、新型催化剂的研发应用及设备的升级改造, 探索提高硫磺回收率、降低成本、增加收益的有效途径, 为硫磺回收行业的可持续发展带来理论支持和实践指导。

### 1 硫磺回收工艺概述

#### 1.1 硫磺回收工艺的重要性

石油、天然气加工产生的含硫气体, 经硫磺回收工艺转化为硫磺, 能够最大限度减少二氧化硫排放, 保护环境。而且, 回收硫磺可替代天然硫资源, 应用在农业、化工以及医药等不同领域, 增加资源利用率的同时节省生产成本, 为企业创造经济效益, 保障工业体系稳定运行<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 常见硫磺回收工艺

①克劳斯法。克劳斯法的反应原理分为两步。首先, 约三分之一体积的硫化氢在反应炉中与氧气发生不完全燃烧, 生成二氧化硫, 化学反应方程式为:  $2H_2S+3O_2 \rightarrow 2SO_2+2H_2O$ ; 接着剩余的硫化氢与生成的二氧化硫在催化剂作用下发生反应, 生成硫磺和水, 化学反应方程式为:  $2H_2S+SO_2 \rightarrow 3S+2H_2O$ 。其工艺流程是, 自脱硫装置来的酸性气全部进入燃烧炉, 在燃

烧炉中完成部分燃烧反应, 燃烧炉温度约为 1200℃, 产物经废热锅炉回收热量后进入装有氧化铝催化剂的转化器, 进行催化转化, 反应产物再进入冷凝冷却器, 液态硫磺流至硫磺罐。②改良克劳斯法。改良克劳斯法是在传统克劳斯法基础上进行改进的工艺。和传统克劳斯法比较来说, 其在催化剂研制、自控仪表应用、材质和防腐技术等方面取得了很大进展。使用新型高效催化剂可以提高反应的活性和选择性, 使反应更充分地进行, 提高硫磺的回收率。在自控仪表应用方面, 采用更先进的自动化控制系统, 精准控制反应条件, 保证反应一直在最佳状态下进行, 最大限度提高了硫磺回收率。

#### 1.3 硫磺回收工艺现状分析

现阶段硫磺回收技术进一步升级, 催化剂性能、自动化控制水平持续优化, 但一些装置依旧有着设备老化、腐蚀严重等情况, 阻碍着整体运行的稳定性。世界各地环保法规愈发严格, 尾气排放限值显著降低, 早期装置面临升级压力, 再加上企业要统筹降本、提效、资源综合利用等各项需求, 工艺优化升级已经刻不容缓<sup>[2]</sup>。

### 2 硫磺回收工艺优化策略

#### 2.1 工艺参数优化

①温度控制优化。在克劳斯法中, 反应炉内约三

分之一体积的硫化氢与氧气不完全燃烧生成二氧化硫，此过程为强放热反应，燃烧炉温度达 1200℃。后续硫化氢与二氧化硫在催化剂作用下生成硫磺和水的反应同样受到温度的严格制约。反应温度过高，虽然能加快反应速率，但会导致催化剂活性降低甚至失活，还会增加副反应的发生几率，如生成 COS、CS<sub>2</sub> 等有机硫，在后续尾气处理过程中较难脱除，硫磺回收率大打折扣。如果反应温度过低，反应速率则会减缓，无法达到预期的生产效率。采用现代化温度监测设备，如高精度热电偶，持续性监测反应炉、转化器等部位温度，并结合自动化控制系统，按照温度变化调整燃料气流量、空气供应量等参数，确保反应温度维持在最佳范围。在某硫磺回收装置中，优化温度控制，将反应温度波动范围控制在 ±5℃ 以内，硫磺回收率提高了 2-3 个百分点，能耗降低了约 5%，副反应发生率进一步降低<sup>[3]</sup>。

②压力调节优化。反应压力的变化会影响气体的浓度以及反应速率，进而影响硫磺回收效果。在一定范围内提高反应压力能够增加反应物分子之间的碰撞频率，加快反应速率，有利于提高硫磺回收率。但是过高的压力会增加设备的投资、运行成本，对设备的耐压性能提出更严格的要求，也可能导致出现不利副反应。对于不同的硫磺回收工艺来说，要按照其特点和反应原理来确定相关压力范围。在克劳斯法中，反应炉内压力通常控制在微正压状态，以保证反应良好进行和避免空气倒吸；在尾气处理工艺中，如 SCOT 工艺，加氢反应器内的压力通常根据反应要求和催化剂的性能调节，在 0.5-3.0MPa 之间。为合理调节压力，还可以用压力传感器持续性监测系统压力，并借助调节压缩机转速、阀门开度等手段来控制压力。

③流量调整优化。酸性气、空气等流量的调整是达到最佳反应效果以及经济效益的关键因素。在硫磺回收工艺中，酸性气是主要反应物，其流量决定着反应规模和产量。空气则为反应提供氧气，与酸性气的流量比例至关重要。在克劳斯法中，酸性气与空气的体积比必须严格控制，以确保硫化氢与二氧化硫的比例接近 2 : 1。酸性气流量过大会导致空气供应不足，使硫化氢无法充分燃烧和反应，降低硫磺回收率；空气流量过大不仅会加大能耗，还使反应温度过高，从而引发各种问题。通过安装高精度的流量测量仪表，如质量流量计来监测酸性气和空气的流量，并按照反应情况以及工艺要求，利用自动化控制系统调整流量调节阀的开度，从而对流量给予精准控制。在具体生产期间还要注重酸性气组成的变化对流量调整的影响，当酸性气中硫化氢含量发生波动时，应调整空气流量以维持最佳反应比例。

## 2.2 催化剂改进

①新型催化剂研发。近年来，科研人员在新型催化剂的研发方面取得了良好进展。如，开发出一种基于纳米技术的催化剂，将活性组分高度分散在纳米级的载体表面，有效增加了催化剂的比表面积以及活性位点，提高了硫磺的转化率。这种新型催化剂在相同的反应条件下可以使硫磺转化率比传统催化剂增加 5-8 个百分点，对有机硫的转化效果也更出色，减少了尾气中有机硫的含量，降低了尾气处理的难度和成本。

②催化剂性能提升。在制备工艺方面，采用现代化制备方法，如溶胶-凝胶法、共沉淀法等，能够控制催化剂的微观结构和活性组分的分布，增强催化剂的均匀性。通过溶胶-凝胶法制备的催化剂，其活性组分在载体上的分散更加均匀，可以最大限度发挥活性组分的作用，增加催化剂的活性。在载体选择上，选用具有高比表面积、良好热稳定性和机械强度的材料作为催化剂载体，如  $\gamma$ -氧化铝、分子筛等。其中， $\gamma$ -氧化铝具有较大的比表面积和大量孔结构，可以为活性组分带来附着位点，其热稳定性和机械强度也可以保证催化剂在高温、高压等条件下正常使用；分子筛载体则具有特殊的孔道结构和酸性中心，可以对反应物分子进行选择性的吸附和催化转化，提高催化剂的选择性。

## 2.3 设备升级改造

①关键设备优化。对于燃烧炉来说，优化其结构设计，采用相关燃烧技术，如分级燃烧、富氧燃烧等，能够使酸性气充分燃烧，减少不完全燃烧产物的生成。分级燃烧技术通过将空气分阶段引入燃烧炉，使酸性气在各个区域充分燃烧，避免了局部高温和缺氧现象，提高了燃烧效率以及硫磺回收率；富氧燃烧技术则通过提高空气中氧气的含量，增强了燃烧反应的强度，并且减少燃烧尾气排放量，降低后续尾气处理的负荷<sup>[4-5]</sup>。反应器的优化通常聚焦在催化剂床层的设计以及气体分布系统的改进上面。科学设计催化剂床层的高度、直径和催化剂的装填方式，保证气体在反应器内均匀分布，与催化剂充分接触，提高反应效率；采用新型气体分布器，如多孔板分布器、旋流分布器等，使气体均匀进入催化剂床层，防止出现气体短路和偏流问题，增强反应器性能。冷凝器的优化重点就是提高其冷凝效率、避免硫磺结晶堵塞，选用高效冷凝管材质和结构，如翅片管冷凝器、螺旋管冷凝器等，可以增加冷凝面积。

②自动化控制系统升级。升级后的自动化控制系统可以对工艺参数给予精准控制，并且对设备运行状态展开持续性监测，提高生产效率，减少劳动强度以及生产成本。安装传感器和仪表，不断采集工艺

过程中的一系列数据并传输到自动化控制系统中；接着，控制系统基于预设的控制策略和算法对数据进行处理，然后通过执行机构，如调节阀、变频器等对工艺参数进行调节，确保工艺过程一直都在最佳状态下运行。

### 3 经济效益评估指标与方法

#### 3.1 成本指标

①原料成本。酸性气作为核心原料，其收集、运输、预处理成本占比较大。工艺优化前，酸性气来源分散、成分复杂，预处理繁琐，供应不稳定时需外购补量，成本较高。优化后通过改进收集与提纯技术，提高硫化氢利用率，相同原料能产出更多硫磺，变相节省单位产品原料成本。②能耗成本。能耗主要包括燃料消耗（维持反应温度）与电力消耗（驱动设备）。优化前因参数控制不准、设备低效，能耗偏高。借助精准控温、调压及设备升级，能够减少燃料浪费与设备负荷，最大限度节省能耗成本。

#### 3.2 收益指标

①硫磺产品收益。硫磺销售收入是核心收益来源，产量取决于工艺效率，价格受市场供需、国际形势影响波动。工艺优化通过提升转化率与选择性，增加硫磺产量，同时提高产品纯度，增强市场竞争力与售价，扩大销售收入。②副产品收益。硫酸是主要副产品，广泛应用于多行业。优化前产量低、质量不稳定，收益有限。优化后通过高效尾气处理提升硫酸产质，稳定满足市场需求，增加额外收益，部分工艺可开发单质硫精细加工产品，进一步提升附加值。

#### 3.3 经济效益评估方法

净现值法（NPV）将未来净现金流量按折现率折算至当期，NPV 大于零说明项目可行，数值越高效益越好；内部收益率法（IRR）反映项目盈利能力，IRR 高于行业基准收益率则可行；投资回收期法计算回收初始投资的时间，周期越短资金周转效率越高。综合运用三种方法能够全面评估优化项目的经济可行性与效益水平。

### 4 工艺优化对经济效益的影响

#### 4.1 成本降低

①原料利用率提高。优化前受反应条件与技术限制，硫化氢转化不完全，资源浪费且增加环保成本。通过精准控温调压、优化气料比及应用新型催化剂，可显著提升原料利用率。某装置优化后硫化氢转化率从 90% 提升至 95% 以上，年处理 10 万 t 含 80% 硫化氢的酸性气，减少 8000t 硫化氢浪费，年节省原料成本数百万元。②能耗降低。优化前设备老化、参数失衡导致能耗偏高。通过精准工艺控制避免能源浪费，

采用高效燃烧炉、变频设备等降低负荷，某装置优化后燃料消耗降低 20%、电力消耗降低 15%，年节省能耗成本上千万元，提升市场竞争力。

#### 4.2 收益增加

①硫磺产量与质量提升。工艺优化通过多维度改进，显著提升硫磺产质。某装置优化前年产硫磺 5 万 t、纯度 98%，单价 800 元/t，年销售收入 4800 万元；优化后年产 6 万 t、纯度 99%，单价 900 元/t，年销售收入增至 5400 万元，增收 600 万元。高纯度硫磺更适配高端领域需求，竞争力更强。②副产品价值挖掘。优化后硫酸产质双升，某装置硫酸年产量从 1 万 t 增至 1.5 万 t，单价从 300 元/t 升至 350 元/t，年收益从 300 万元增至 525 万元，增收 225 万元。同时可深度开发单质硫精细产品，切入高端市场，进一步扩大收益空间。

#### 4.3 综合经济效益评估

以初始投资 5000 万元、计算期 10 年、折现率 10% 的优化项目为例，年成本降低 1000 万元、收益增加 1500 万元，年净现金流量 2500 万元。经计算，项目净现值约 3268.52 万元（大于零），内部收益率约 25%（高于 10% 行业基准），投资回收期 2 年（处于合理范围），表明工艺优化项目盈利能力强、回收快，经济价值显著。

### 5 结语

本研究分析了硫磺回收工艺优化对经济效益的影响。从硫磺回收工艺的概述出发，阐述了常见工艺及其现状，明确了工艺优化的必要性；提出的工艺参数优化、催化剂改进和设备升级改造等策略，从不同角度提升了硫磺回收工艺的性能。后续研究可以拓展研究范围，探讨新兴工艺和潜在影响因素，为硫磺回收工艺的持续优化提供更全面、深入的理论依据。

#### 参考文献：

- [1] 涂连涛, 漆小川, 郭旭, 等. 分子炼油工艺流程优化实践与探索 [J]. 石油与天然气化工, 2026(1):1-5.
- [2] 王彦, 苏海鹏. 酸性气体硫磺回收装置关键参数及能耗分析 [J]. 石油和化工设备, 2024,27(07):24-28.
- [3] 方丹. 硫磺回收尾气排放工艺优化改进 [J]. 当代化工研究, 2024(11):104-106.
- [4] 蔡盼. 大型天然气净化厂硫磺回收装置尾气 SO<sub>2</sub> 减排技术 [J]. 炼油技术与工程, 2024,54(04):11-15.
- [5] 李军, 王鹏. 克劳斯硫回收工艺中催化剂的研究进展与应用 [J]. 石油化工, 2023,52(5):632-639.

#### 作者简介：

田旺博 (1998-), 男, 陕西渭南人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 技术操作。