

不溶性硫磺生产过程成本控制与优化研究

蒋芳龙 李娜 (福建医工设计院有限公司山东分公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 当前我国不溶性硫磺产业规模持续扩大, 但多数企业仍采用传统生产工艺, 普遍存在原料转化率偏低、溶剂损耗较高、能耗偏大、管理较为粗放等问题, 直接导致企业生产成本居高不下, 市场竞争力不足。本文针对不溶性硫磺生产流程进行梳理, 剖析生产成本组成及其主要影响因素, 在原材料和生产工艺改进、溶剂循环使用以及节能、废物综合利用、现场成本管控等方面提出了具体的降低生产成本的方法和建议, 并在实际工作中进一步完善了部分参数值。

关键词: 不溶性硫磺; 成本控制; 工艺优化; 节能降耗; 精细化管理

中图分类号: TQ125.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0076-03

Research on Cost Control and Optimization of Insoluble Sulfur Production Process

Jiang Fanglong, Li na (Fujian Medical Engineering Design Institute Co., Ltd. Shandong Branch, Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: Currently, the scale of China's insoluble sulfur industry continues to expand, but most enterprises still use traditional production processes, which generally have problems such as low raw material conversion rates, high solvent losses, high energy consumption, and extensive management, directly leading to high production costs and insufficient market competitiveness. This article reviews the production process of insoluble sulfur, analyzes the composition of production costs and their main influencing factors, and proposes specific methods and suggestions for reducing production costs in areas such as improving raw materials and production processes, solvent recycling, energy conservation, comprehensive waste utilization, and on-site cost control. Some parameter values have also been further improved in practical work.

Keywords: insoluble sulfur; Cost control; Process optimization; Energy conservation and consumption reduction; refined management

近年来, 我国汽车制造业转型升级, 生产更多高档次环保型汽车, 子午线轮胎数量增加, 因此对不溶性硫磺的需求也越来越多, 市场逐渐扩大。当前, 国内不溶性硫磺生产企业主要采用熔融法和气化法两种工艺, 其中熔融法因设备投资低、操作简便, 成为多数中小企业的的首选, 但该工艺存在转化率偏低、能耗较高、溶剂损耗大等弊端; 气化法虽产品纯度高、稳定性好, 但设备要求严苛、能耗成本突出。在此背景下, 开展不溶性硫磺生产过程成本控制与优化研究, 破解生产环节的成本痛点, 实现精细化、低成本、绿色化生产, 已成为企业生存发展的迫切需求, 也是推动行业整体效益提升的重要路径。

1 不溶性硫磺生产现状与成本构成

1.1 生产现状

目前, 国内不溶性硫磺生产企业主要分布在山东、江苏、河南等工业大省, 生产规模差异较大, 大型企业已实现连续化、规模化生产, 而中小企业仍以间歇式生产为主。主流生产工艺分为熔融法和气化法: 熔融法工艺流程为原料硫磺→熔融→聚合→淬冷→粗品→萃取→过滤→干燥→稳定化→成品, 该工艺转化率约 35%~45%, 产品热稳定性中等, 设备投资低、操

作门槛低, 但物料损耗较大; 气化法工艺流程为原料硫磺→气化→骤冷→聚合→萃取→干燥→稳定化→成品, 反应温度高达 500~700℃, 转化率可达 55%~70%, 产品纯度高, 但能耗高、设备腐蚀严重, 前期投资较大。当前行业普遍存在的问题是: 多数企业工艺装备较为落后, 间歇式生产占比偏高, 生产过程中参数控制不精准, 导致产品收率波动大; 溶剂回收效率低, 无组织排放严重; 余热利用不充分, 能源浪费突出; 副产物回收利用率低, 既造成资源浪费, 又增加环保处理成本; 成本管理体系不完善, 精细化程度不足, 隐性成本流失严重。

1.2 成本构成

原料成本, 占总成本的 40%~45%, 核心为工业硫磺, 其次为少量辅助原料。原料硫磺的价格受原油、炼厂副产硫供应影响较大, 波动较为频繁, 其纯度直接影响反应转化率, 纯度低于 99.5% 时, 杂质会降低聚合效率, 增加原料消耗。溶剂及辅料成本, 占总成本的 18%~22%, 主要包括萃取剂二硫化碳 (CS₂)、稳定剂 (金属卤化物、不饱和烯烃等)、淬冷介质等。其中二硫化碳是最核心的辅料, 价格较高、易挥发, 其损耗量直接决定辅料成本的高低, 也是成本控制的

重点环节。能耗费用, 约占总成本的 15% ~ 18%, 主要是指蒸汽、电能、燃煤(或燃气), 主要集中在聚合、干燥、气化等耗热过程, 其中聚合工序温度要控制在 180 ~ 220℃(熔融法)或 500 ~ 700℃(气化法), 干燥过程温度为 120 ~ 150℃, 能耗最大, 降耗潜力较大。人工费以及维修费, 约占总成本的 8% ~ 10%, 主要是指生产操作工、技术员、机械维修工工资, 及设备日常维护、检修费用。间歇式生产人工需求量大, 人工成本偏高; 连续化生产可大幅减少人工投入, 降低人工成本。环保及折旧成本, 占总成本的 7%~10%, 其中环保成本包括废水、废气、固废的处理费用, 随着安全环保政策趋严, 环保投入逐年增加; 折旧成本主要为生产设备、厂房的折旧摊销, 大型连续化设备折旧成本相对较高, 但可通过提升生产效率摊薄单位折旧。

2 成本控制关键影响因素分析

2.1 原料转化率与物料利用率

原料转化率决定了最终的成本, 其高低直接影响原料消耗量。目前国内间歇式的熔融法生产转化率一般为 35%~45%, 而连续化的熔融法转化率为 50%~55%, 气化法可以达到 55%~70%。低转化率意味着大量的可溶性硫没有转变为不溶性的硫磺, 只能作为副产品进行销售(价格仅为成品的 1/3~1/2)。一方面导致硫资源的浪费, 另一方面增加了新鲜原料的投入量, 直接提高单位产品的成本; 另外, 在原料的储存、输送、投料过程中产生的跑冒滴漏及原料本身纯度不够等情况也会降低物料的利用率, 增加成本损失。如原料硫磺的纯度每降低一个百分点, 则会导致转化率降低 2% ~ 3%, 原料单耗增加 3% ~ 5%。

2.2 溶剂消耗与回收效率

二硫化碳作为不溶性硫磺生产的主萃取剂, 其消耗及回收对辅料成本起着决定作用。传统生产工艺中, 二硫化碳回收主要以简单的冷凝方式进行, 回收率为 75%~85%, 15%~25% 左右的溶剂则以尾气夹带、设备泄露、操作损失等形式散失掉; 据不完全统计, 在传统工艺下二硫化碳单耗可达 80~120kg/t, 而先进工艺单耗能控制在 50kg/t 以内, 溶剂损耗的不同造成辅料成本相差了 30%~40%, 再加上溶剂回收设备老化、密封性能差、操作不规范等因素, 会进一步增加溶剂损耗, 推高生产成本。

2.3 能源消耗与余热利用

能耗是不溶性硫磺生产的首要成本支出项, 主要受制于生产工艺、设备效率、余热利用率等因素的影响。气化法耗能远远超过熔融法, 生产每吨不溶性硫磺, 气化法约消耗折标煤 2.2 ~ 2.5t, 熔融法约

消耗折标煤 1.8 ~ 2.1t; 并且在生产中产生的大量高温烟气、干燥尾气等余热未能充分利用。设备保温效果不好, 泵、风机类动力设备没有进行变频改造, 均会造成能源的浪费。比如聚合工艺中的高温烟道气(300~400℃), 如果不用的话, 每年将浪费很多热量; 动力设备没有变频, 每年将会多消耗 10%~15% 的电量。

2.4 生产管理与设备运行水平

生产管理和设备运转水平关系着生产效率、产品质量合格率及生产成本消耗。有的企业还是靠人海战术, 对生产工艺条件(温度、压力、停留时间等)控制波动大, 容易造成局部过热、淬冷不均等情况发生, 致使产品质量合格率不高, 反复返工处理, 加大了生产成本费用支出; 设备维修保养不够到位, 跑冒滴漏情况没有得到及时有效治理, 不仅会造成物耗能耗浪费, 而且会引起设备故障增多、非计划停车, 进一步增加维修费用及生产损失; 成本管理粗放, 没有健全的定额管理和考核机制, 人员节约意识不强, 隐性成本流失严重。

3 不溶性硫磺成本控制与优化措施

3.1 优化生产工艺, 提高原料转化率

工艺优化是提高原料转化率、降低原料消耗的核心手段, 重点推进间歇式工艺向连续化工艺改造, 同时优化反应参数, 提升物料利用率。一是推进连续化改造, 将传统间歇釜式聚合改为连续管式聚合, 通过 DCS 自动化控制系统, 精准控制聚合温度(熔融法 200~220℃、气化法 550~650℃)、压力(熔融法 0.3~0.5MPa、气化法 0.8~1.0MPa)和物料停留时间(15~25min), 可使转化率提升 15%~20%, 原料单耗下降 12%~18%。二是优选原料, 严格采购纯度 $\geq 99.5\%$ 的工业硫磺, 减少杂质对反应的影响, 同时建立原料检验机制, 不合格原料严禁入库。三是推进副产硫循环利用, 将萃取后产生的可溶性硫过滤、干燥、提纯后, 返回熔融工段重新参与反应, 提高硫元素总利用率, 使硫回收率从 38%~45% 提升至 90% 以上, 大幅减少新鲜原料投入。四是优化后处理工序, 采用精准淬冷技术(淬冷温度控制在 35~40℃), 减少不溶性硫磺热分解损耗; 优化干燥工艺, 采用低温连续干燥方式, 降低干燥能耗的同时, 提升产品稳定性。

3.2 强化溶剂回收与节能降耗

改造溶剂回收设施, 利用“深冷冷凝+压缩回收+尾气吸附”工艺, 提高二硫化碳回收率至 92% 以上。即把萃取尾气先压缩到 450~500kPa, 然后经过深冷降温到 8~10℃把二硫化碳冷凝下来进行回收; 剩下的尾气用改性白油吸附剂来吸收, 解吸后再返回使用, 这

样可以将二硫化碳单耗由 100kg/t 降低到 45kg/t 以内。辅材费用降低 35%~40%。强化设备密封,对萃取、过滤、干燥工序设备实施密闭改造,更换密封圈,消除跑冒滴漏,减少无组织排放及溶剂损失。开展节能技改,对聚合工序高温烟气、干燥尾气余热回收,经余热换热器加热原料硫磺和锅炉给水,可以节约蒸汽 15%~20%;将泵、风机、压缩机等动力设备实施变频改造,提高设备运行负荷率,节约用电量 10%~15%;对设备及管路实施高效的保温措施,减少热量散失。建立能耗定额管理制度,分工段、分设备制定蒸汽、电力、燃煤(燃气)消耗定额,实时监控能耗数据,超耗预警、及时整改,确保能耗控制在合理范围。

3.3 推进副产物资源化与绿色生产

推进硫资源全循环,对生产过程中产生的滤渣、废硫、可溶性硫等副产物,采用热解提纯工艺,去除杂质后返回聚合工段循环使用,使硫元素闭环利用,减少原料浪费的同时,降低固废处理费用。优化三废治理工艺,废水采用“隔油+生化处理”工艺,处理后达标排放,同时尝试废水回用,减少新鲜水消耗;废气采用“陶瓷滤管除尘+湿式电除尘+碱洗”工艺,回收尾气中的硫粉,达标排放的同时,实现硫资源回收;固废经无害化处理后,优先回收利用,无法回收的按规范处置,降低环保处理成本。推广无水化生产技术,优化萃取、稳定化工序,减少水资源消耗和废水产生,使废水排放量下降 60% 以上,进一步降低环保处理成本。

3.4 实施精细化管理,提升运行效率

精细化管理是成本节约的长效机制,主要从优化管理制度、加强设备维护保养、提高人员素质等方面入手,降低隐性成本损失;建立全流程的成本控制制度,以工段、班组、产品为单位进行成本核算,明确原材料、溶剂、能源等消耗定额,并将其分解落实至每名员工及每个操作单元,“谁使用、谁承担”,将控本降耗与职工绩效考核相结合,增强全员节约意识;加强设备标准化管理,实施设备日常点检、定期检修制度,及时消除设备故障及跑冒滴漏现象,降低非计划停车次数,增加装置开工率和稳定运行时间,降低维修费用和损耗;推进智能控制,全面推行 DCS 自动化控制系统。达到工艺参数的自动调节、监测及报警,减少人为的操作波动,提高产品的合格率以及生产效率,降低人工成本和返工损失。

4 成本优化效果与效益分析

原料消耗大幅下降,原料转化率由 42% 提升至 58%,硫元素总利用率由 40% 提升至 94%,原料硫磺单耗从 2.38t/t 降至 1.958t/t,年减少原料采购量

430t,按原料硫磺均价 1800 元/t 计算,年节约原料成本 77.4 万元。溶剂损耗显著降低,二硫化碳单耗从 110kg/t 降至 45kg/t,年减少溶剂消耗 65t,按二硫化碳均价 8500 元/t 计算,年节约辅料成本 55.25 万元。节能降本,通过余热回收、变频改造等方式降低综合能耗,由 2.1t/t 折标煤降至 1.6t/t,年节约标煤 5000t,按照标煤均价 700 元/t 计算,年节约能源成本 350 万元;环保及维修降本,通过对副产物进行资源化利用,每年节约固废处理费 28 万元;通过对设备的运维改善,降低了非计划停车率达 80%。维修费用每年可减少 32 万元。产品质量提高,产品合格率从原来的 88% 提高到 98%,减少了产品的返工损失,降低了生产的成本。综上所述,在采取上述优化措施之后,该厂单位产品成本下降了 18.5%,年节约总成本达 542.65 万元,毛利率上升 12 个百分点,市场竞争力得到明显提升。实践证明,不溶性硫磺生产过程的成本控制及优化是一个系统的工程,总之,要立足于企业的工艺装备现状,在原料、工艺、溶剂、能源以及管理等方面综合考虑,从技术和管理两方面着手改进,才能做到降低成本、增加效益的目的。

5 结语

目前,不溶性硫磺市场竞争激烈,如何降低成本是不溶性硫磺企业增强竞争优势的关键因素之一。对于不溶性硫磺企业来说,只有根据本企业的设备水平,明确制约成本的主要因素,在提高硫磺利用率、减少溶剂损失以及节电、回收利用等方面进行改进和完善,才能增强自身的市场竞争力。因此,在工艺优化、溶剂循环利用、副产品综合利用、节能降耗等方面进行改进和完善,能够显著降低成本,提高产品纯度及附加值,并有利于达到节能减排目标,顺应安全环保的发展趋势。

参考文献:

- [1] 袁庆臣,段亚芳,王大同.不溶性硫磺生产过程的传热分析[J].硫磷设计与粉体工程,2024,(02):5-8+36+57.
- [2] 周亮亮.不溶性硫磺萃取剂与分散性研究及生产工艺的模拟优化[D].济南:山东大学,2024.
- [3] 郭振.不溶性硫磺生产中反应器的设计与优化[D].锦州:辽宁工业大学,2020.
- [4] 张颂,张怀坤,宋晓举,等.不溶性硫磺生产中副产物结晶废硫的提纯研究[J].山东化工,2019,48(08):123-125
- [5] 王荣杰.熔融法清洁制取高质量不溶性硫磺的关键技术研究[D].华东理工大学,2019.