

胺液系统异常导致加氢产品硫超标的诊断与系统性对策研究

杨雯晶* 齐明臣 刘志飞 张宏伟 蔺世桢

山东京博石油化工有限公司, 山东 滨州 256500

摘要: 针对汽柴油加氢装置出现的精制柴油产品硫含量异常超标问题, 本文开展了一系列系统的诊断与治理研究。通过构建“产品质量→工艺参数→设备状态”的三级故障诊断模型, 并排查了反应器催化剂活性不足及原料油/产品换热器内漏等其他常见可能性, 最终精准溯源至胺液再生系统的根本症结: 因富液过滤器前期部分副线开启, 导致机械杂质侵入并在再生塔塔盘上累积, 引发塔盘堵塞, 破坏了塔内正常的汽液传质与回流过程, 最终致使胺液再生效果恶化、循环氢脱硫效率下降。基于此, 研究不仅实施了更换过滤器滤芯、再生塔水洗、系统撇油等立竿见影的应急措施, 更从根本层面构建了一套全流程的预防性维护策略。该策略涵盖了源头原料控制、过程过滤器压差智能监控与定期水洗、以及应急再生系统在线切除方案。实践结果表明, 所采取的措施成功恢复了产品质量, 且由此总结的故障诊断模型与系统性维护策略, 突破了传统经验型处理的局限, 为同类装置预防与处理类似胺液系统故障、实现长周期稳定运行提供了具有重要推广价值的理论依据和实践模板。

关键词: 加氢精制 脱硫 胺液再生 故障诊断 塔盘堵塞 预防性维护

随着全球环保法规的日益严格和我国“双碳”目标的深入推进, 清洁燃油质量升级已成为炼油工业发展的必然趋势。硫含量作为汽柴油产品的关键质量指标, 其控制精度直接决定了炼化企业的市场竞争力和环保合规性。加氢精制作为现今生产清洁燃料最核心的工艺装置, 循环氢脱硫系统的稳定性是保障加氢反应深度和最终产品质量的基石^[1-2]。该系统通过胺液(如MDEA)循环吸收、再生, 持续脱除循环氢中的H₂S^[3]。一旦胺液再生系统出现异常, 将导致贫胺液质量下降, 引发循环氢H₂S含量升高、反应氢分压不足, 最终造成产品硫含量超标。因此, 胺液再生系统的健康稳定运行, 是加氢装置实现长周期、高负荷、优质生产的命脉。在实际生产中, 胺液再生系统因流程长、介质复杂, 其隐性故障(如塔盘堵塞)的诊断与处理极具挑战^[4]。此类故障初期表征往往不明显, 但具有渐进性和累积性, 一旦显现, 通常已对产品质量构成实质性影响, 传统的、被动的应急处理方式极易贻误最佳处理时机, 同时, 难以从根本上预防同类问题的重复发生。

本研究聚焦于炼厂汽柴油加氢装置发生的一起典型的、由胺液再生塔堵塞引发的柴油产品硫含量超标事件。该案例的典型特征在于其清晰地展示了从单一设备(过滤器)的管理疏失, 到核心单元(再生塔)的功能失效, 最终导致全局

性产品质量危机的完整故障传导链。本文采用理论分析与实践验证相结合的工程研究方法, 遵循“现象精准表征→多级诊断溯源→综合治理实践→模型策略升华”的逻辑主线, 旨在将一次被动的故障处理, 系统性地升华为一套主动的、具有普适指导意义的故障诊断方法与预防性维护策略。

1 故障现象与系统性诊断

1.1 装置概况与初始异常表征

本研究所涉及的汽柴油加氢装置, 其循环氢脱硫与胺液再生系统是保障加氢反应深度和最终产品质量的核心单元。该系统通过MDEA溶液吸收循环氢中的H₂S, 富含H₂S的富胺液在再生塔中解析出酸性气, 恢复吸收能力, 形成连续的脱硫循环。

2023年2月19日, 胺液再生单元首次出现不明原因的波动, 具体表现为再生塔液位与塔顶回流罐液位无法维持稳定, 呈现同步的剧烈波动, 并伴随外送酸性气流量的相应震荡。这一现象是系统平衡被打破的初步且关键的预警信号。

1.2 初步应对与故障反复及攻坚

针对初始波动, 采取了更换富液过滤器滤芯与调整再生系统补水点(注水点由向贫液罐注水改至向溶剂再生塔直接注水)进行在线水洗的措施。调整后, 系统波动一度缓和, 表明在线洗塔操作在一定程度上暂时改善了塔内的操作环

境。然而，水洗置换过程历时较长且效果不稳定。3月3日，停止 P1503 补水后，系统波动随即显著加剧，如图 1 所示，表明塔盘深层堵塞严重，在线清洗已难以根除病根，同时，揭示了系统对操作条件异常敏感，其内在的平衡十分脆弱。

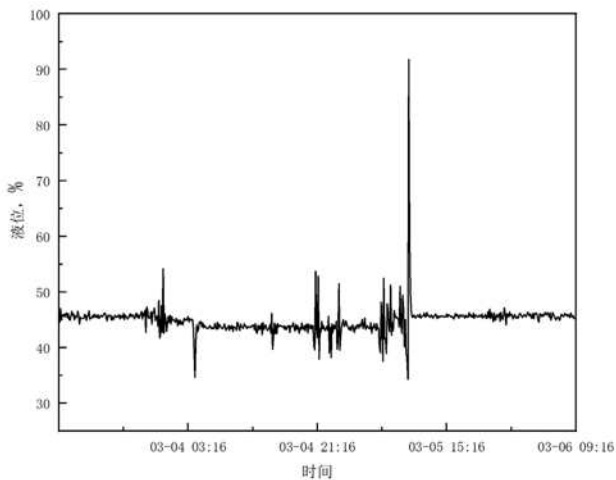


图 1 溶剂再生塔液位变化趋势图

事态在 2023 年 3 月 5 日进一步恶化。系统发生严重波动，再生塔液位持续偏低，塔底泵出口调节阀开度一度低至 3%，同时贫液罐液位持续下降，而回流罐液位则快速上涨至 100%。为避免酸性气带液对下游硫磺回收装置造成冲击，操作人员被迫手动切断酸性气外送阀。此次事件标志着故障已从初步的参数波动，升级为严重影响再生系统基本功能、威胁上下游装置平稳运行的严重生产异常。

1.3 故障影响的传导与产品质量的恶化

随着再生系统工况的持续恶化，其影响最终突破了胺液系统的边界，向加氢反应系统反向传导。2023 年 3 月 20 日，故障的连锁效应全面显现：

(1) 循环氢脱硫功能失效：3 月 20 日 14:00 起，循环氢中的 H₂S 含量开始持续攀升，最终达到分析仪量程上限 2000ppm，如图 2 所示，证明胺液再生效果已严重丧失，贫胺液质量无法满足基本的脱硫要求。

(2) 最终产品质量超标：循环氢中高浓度的 H₂S 导致反应系统内氢分压降低，加氢反应深度下降，柴油产品总硫含量呈现持续上涨趋势，在线分析仪监测数据峰值达到 17.14ppm，柴油产品质量超出控制指标 (<10ppm)。装置被迫进行降量操作以维持产品质量。

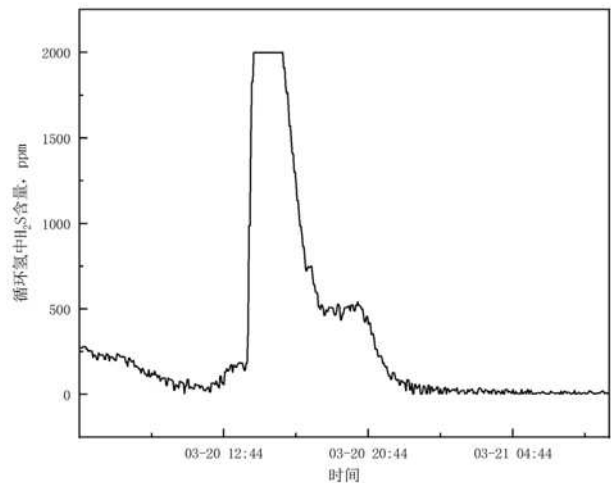


图 2 循环氢中的 H₂S 含量趋势图

在产品质量恶化的严峻形势下，采取了继续强化冲洗置换的最后尝试，在降量维持生产的同时，持续进行了更有力的在线水洗和系统置换操作。与此同时，一个更为彻底的应急预案被启动并处于待命状态：若此次强化冲洗在预定时间内仍无法使产品质量和系统参数恢复正常，装置将立即投用已准备好的技改项目流程，将加氢富液全部引至焦化装置的溶剂再生系统进行处理，从而将本装置的再生系统从流程中彻底切除，进行离线检维修。这一预案代表了故障处理的最终方案，也体现了在保障全厂连续生产前提下的最大操作弹性。幸运的是，在此次持续且强化的置换清洗作用下，系统出现了决定性的转机。再生塔的压差与液位逐渐趋于平稳，贫胺液质量开始恢复。最终，系统成功恢复正常，避免了启用终极应急预案，如图 3 所示

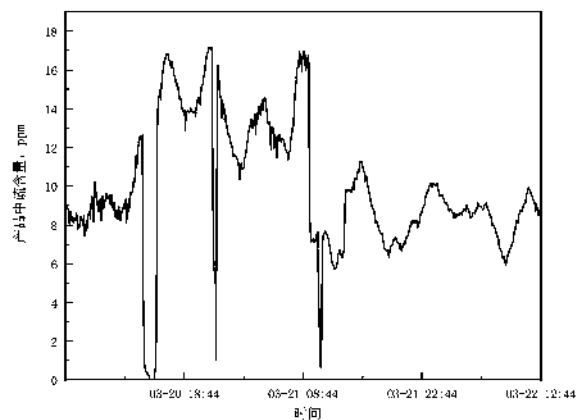


图 3 柴油总硫变化趋势图（注：硫含量将低至 1ppm 以下的点为在线检测仪切出点）。这一结果证明，对于此类深层次但尚未完全板结的塔盘堵塞，在线清洗仍具备恢复系统功

能的潜力，而周全的应急预案则是装置敢于在极限状态下进行操作探索的坚实后盾。

1.4 系统性根因诊断与综合分析

本研究采用系统性分析方法，构建诊断模型，对根本原因进行逐级追溯与排除：

第一级诊断（结果层）：产品质量超标。

第二级诊断（传导层）：循环氢脱硫失效。循环氢中H₂S含量超高，直指贫胺液的吸收能力不足，根源在于胺液再生系统效率低下，贫胺液质量不合格。

第三级诊断（核心层）：胺液再生系统功能丧失与竞争性原因排查。

1.4.1 反应深度不足可能性排查：

（1）反应温度：对比历史数据，反应温度及温升正常，且提温后产品硫含量无改善。

（2）催化剂活性：运行周期未至末期，且加氢脱氮（HDN）、烯烃饱和等反应效率未同步大幅下降。

（3）结论：有效排除了反应器催化剂活性下降导致反应深度不足的可能性。

1.4.2 原料油 / 产品柴油换热器内漏可能性^[5] 排查：

（1）运行数据：产品质量异常期间，换热器两侧压差未见持续异常变化，与内漏特征不符。

（2）产品性质：产品质量异常期间，产品柴油的金属杂质、馏程、氮含量等关键指标保持稳定。若换热器内漏导致原料油渗入产品端，这些参数应同步趋向原料油性质。“产品硫含量单项超标”表明污染源是富硫且不改变其他性质的物流，而非原料油。

（3）故障恢复反证：系统在未对换热器进行任何处理的情况下，通过修复胺液系统即恢复正常。若为换热器内漏，产品质量无法自行恢复。

（4）结论：确定性地排除了换热器内漏是本次异常的主要原因。

1.4.3 根本原因锁定：胺液再生塔塔盘堵塞

（1）直接证据：再生塔与回流罐的关联性剧烈波动是典型塔盘堵塞特征。

（2）历史操作追溯：“富液过滤器前期开启部分副线”是导致杂质侵入的起始点。

（3）完整因果链：富液过滤器副线开启→杂质侵入再生系统→再生塔塔盘堵塞→塔内传质与回流破坏→胺液再

生效果恶化→贫胺液质量不合格→循环氢脱硫效率下降→反应系统氢分压不足→柴油产品硫含量超标。

2 综合治理措施的实施与效果

在精准诊断出根本原因后，为迅速恢复生产并巩固成果，本研究制定并实施了一套“短期应急、中期巩固、长期根治”的综合治理措施。

2.1 应急处理措施

2.1.1 降低加工负荷，稳定操作基础

为防止产品质量进一步恶化，并为后续调整创造稳定的操作窗口，装置主动、有序地降低了加工量。通过降低原料进料量，有效降低了反应系统的总体苛刻度与循环氢脱硫系统的处理负荷，为胺液系统的恢复争取时间。

2.1.2 强化在线水洗，攻坚塔盘堵塞：

在产品质量已恶化的严峻形势下，持续从P1503入口注入除盐水，并进行长时间、高强度的塔顶回流洗涤，对再生塔进行持续的在线攻坚清洗。此举旨在利用水流的冲刷与溶解作用，最大限度地清除塔盘上已积聚但尚未完全板结的杂质，恢复基本的传质效率。

2.1.3 恢复过滤功能，切断污染源：

确保富液过滤器与贫液出口过滤器均正常投用。更换已堵塞的富液过滤器滤芯，切断杂质继续侵入再生塔的主要路径；贫液过滤器的有效投用，关键性地截留了自再生塔底带出的悬浮固体及胶质污染物，切断了其在胺液系统中的闭路循环，保障了下游换热设备及脱硫塔胺液分布器的平稳运行。同时，该过程实现了对系统内既有杂质的持续剥离，促进了胺液体系洁净度的逐步恢复。

2.1.4 稳定操作环境，辅助系统恢复：

对循环氢脱硫塔及富液闪蒸罐进行集中、彻底的撇油操作，最大限度地去除胺液系统中的烃类物质，减少发泡风险，为再生塔创造一个稳定的操作环境。

2.1.5 调整反应系统，补偿氢分压：

作为保障产品质量的辅助应急手段，提高反应压力由7.0 MPa提升至7.5 MPa以上。通过提升系统总压，部分补偿因循环氢H₂S含量过高导致的氢分压下降，为加氢反应提供必要的动力学条件。

2.2 效果验证与趋势分析

上述措施实施后，关键工艺参数的监控数据清晰地展示了系统状态的恢复过程：

(1) 再生系统恢复稳定：再生塔及回流罐的液位波动幅度在强化水洗后显著减小，并于数小时内趋于平稳，塔压差呈现稳定下降趋势。

(2) 胺液再生效果好转：随着塔盘的疏通，贫胺液的品质迅速恢复，其 H₂S 负荷显著降低，浓度趋于稳定。

(3) 循环氢质量恢复正常：作为最直接的成效，循环氢中的 H₂S 含量在 24 小时内从 2000ppm 的满量程高位迅速回落至正常工艺控制范围 (<100ppm)。

(4) 产品质量回归合格：随着循环氢质量的改善，柴油产品的总硫含量稳步下降，并稳定恢复至 10ppm 以下的合格水平，装置恢复正常生产。

2.3 根本性整改与预案准备

应急措施的成功证明了诊断方向的正确性，但为了根除隐患，同步启动了根本性整改：

(1) 制定终极应急预案：通过实施“加氢富液至焦化溶剂再生系统”技改项目，确保在线措施若最终失效，可立即将本装置再生系统安全切除并进行离线检修，保障反应系统不停车。

(2) 过滤器管理标准化：严禁副线长开，建立压差三级报警与定期更换标准操作。

(3) 再生塔定期维护：将在线水洗纳入预防性维护操作规程。

3 系统性策略构建

为将个案经验转化为行业资产，本研究构建了一套涵盖故障快速诊断与全流程主动预防的双重策略体系。

3.1 故障诊断模型的建立

本研究构建的“加氢装置胺液系统三级故障诊断模型”，为快速精准定位故障提供了标准化流程。其系统性逻辑结构如图 4 所示。该模型遵循从结果到原因、从系统到设备的追溯原则，并嵌入了对关键竞争性原因的并行排查流程。

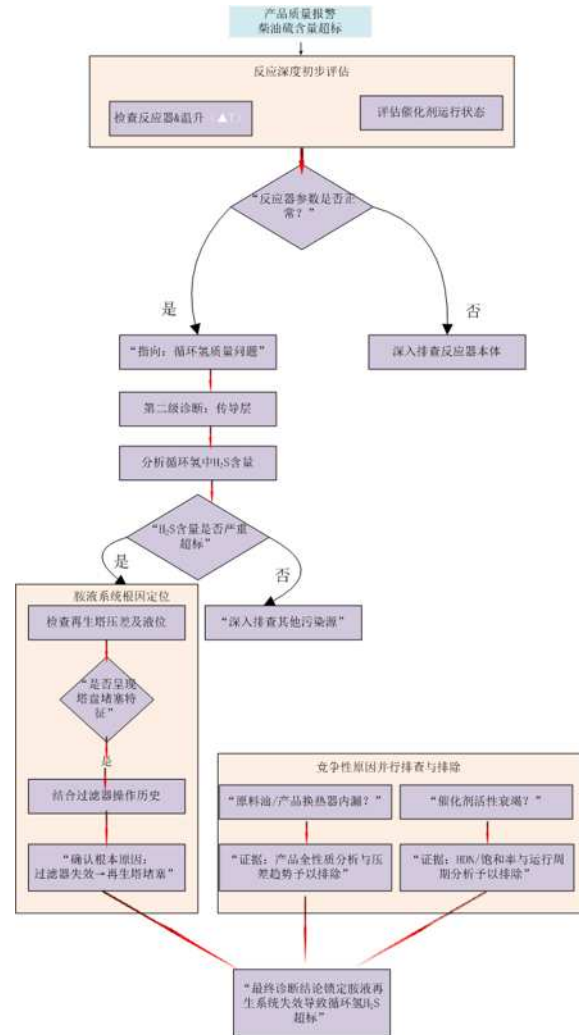


图 4 系统性逻辑结构图

3.2 全流程预防性维护策略的制定

从事前、事中、事后三个维度，构建了全流程预防性维护策略体系：

3.2.1 源头防控（事前）

(1) 原料油精细化管理：制定并严格执行原料油馏程与杂质含量等控制指标。

(2) 过程多重屏障防护：在原料油进装置端，确保反冲洗过滤器的稳定、有效投用，从源头降低固体杂质侵入系统的可能性。

(3) 撇油操作制度化：将撇油操作纳入操作规程，明确频率、责任与记录，实现早期预警。

3.2.2 过程监控（事中）

(1) 过滤器智能监控：严禁过滤器副线长开，建立压差“三级报警”制度（0.10MPa 预警，0.13MPa 准备，0.15MPa

更换), 确定滤芯定期更换周期。

(2) 再生塔定期维护: 将“P1503 入口补水-塔顶水洗”从事故措施转变为每季度的预防性维护项目。

(3) 胺液品质常态化监测: 建立胺液定期全分析制度, 实现基于数据的预测性维护。

3.2.3 应急保障 (事后 / 预案)

再生系统在线切除方案的制定与演练: 确保在再生系统发生不可恢复的严重故障时, 能够实现安全、快速隔离, 保障加氢反应单元不停车。

4 结论与展望

4.1 主要结论

(1) 本次异常的根本原因是“富液过滤器管理不当→杂质侵入→再生塔塔盘堵塞”导致的系统性功能衰竭。

(2) 所构建的“三级故障诊断模型”能实现故障的快速精准定位, 将异常处置从经验依赖提升为标准化流程。

(3) 制定的“全流程预防性维护体系”是杜绝同类故障、实现装置长周期稳定运行的关键。

4.2 展望

(1) 智能化预测性维护: 未来可开发在线监测与智能

预警平台, 实现故障的预测性报警。

(2) 堵塞机理与高效清洗技术研究: 可深入研究不同杂质的结垢机理, 开发高效在线清洗技术。

(3) 先进过滤技术应用: 评估超滤、磁分离等技术在富胺液预处理环节的可行性, 从源头提升可靠性。

参考文献:

[1] 王天鹏. 石油炼制中的加氢技术原理分析及运用 [J]. 技术研究, 2025, (11): 133-135.

[2] 徐浩. 柴油加氢精制装置胺液脱硫系统问题分析及对策 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(3): 45-48.

[3] 李大东. 加氢处理工艺与工程 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 637.

[4] 方秋建. 柴油加氢改质装置长周期运行影响因素分析 [J]. 石油石化绿色低碳, 2024, 9(02): 65-71.

[5] 刘劲松. 柴油加氢装置开工问题分析与对策 [J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(5): 24-28.

作者简介: 杨雯晶 (1989—), 女, 汉族, 硕士研究生, 化学工程与技术。