

石化装置触媒硫化用氢气及CS₂管线的环保融合策略探究

蔡磊磊¹ 杨建世²

1. 山东捷润检测有限公司; 2. 山东胜睿工程技术咨询有限公司

摘要: 本文针对石化装置中变换催化剂硫化工艺存在的污染重、泄漏风险高、反应控制难度大等问题, 提出采用氢气与二硫化碳(CS₂)联合硫化技术, 并从管线设计、施工组织、安全控制到环保策略进行系统性研究。文章重点分析了硫化氢泄漏的影响因素, 包括装置工况波动、现场环境扰动及检测系统老化等, 并提出了管线优化、泄漏预防、多点监测和尾气治理等融合策略。研究结果显示, 该方案不仅降低了生产过程的环境风险和经济成本, 也提升了硫化效率与安全保障能力, 为石化行业绿色高效运行提供了切实可行的技术路径。

关键词: 石化装置; 催化剂硫化; 氢气; 二硫化碳; 硫化氢泄漏; 环保融合

石化装置在大修后恢复运行期间, 变换催化剂需进行预硫化操作, 以确保其活性和稳定性。传统采用含硫煤气进行催化剂硫化, 但该方式存在硫含量难控制、污染大、能耗高等问题, 且容易引发硫化氢泄漏等安全事故。近年来, 绿色高效与本质安全理念在石化行业中日益重视, 促使企业不断寻求新的工艺路径。本文以氢气和二硫化碳(CS₂)替代含硫煤气作为硫化介质, 结合配套管线设计、现场施工与泄漏防控策略, 提出一整套可操作的优化方案, 对推动行业高质量发展具有一定参考价值。

1 催化剂硫化工艺优化需求分析

1.1 装置大修后硫化工艺面临的挑战

石化装置在大修完成后, 变换催化剂需重新进行硫化活化操作。然而此阶段工况尚未稳定, 压力、流量、温度调节精度受限, 导致传统含硫煤气硫化方案风险加大。一方面, 含硫煤气组分复杂, 反应控制困难; 另一

方面, 启停过程中排气路径可能存在局部泄漏隐患。此外, 硫化所用气源多来自联动装置, 缺乏独立控制能力, 且若管线老旧、密封件老化, 还可能引发硫化氢等有害气体泄漏。装置重启阶段亟须更稳定、独立、易控的新型硫化路径支持运行安全。

1.2 氢气与二硫化碳预硫化工艺适配性分析

氢气与二硫化碳的联合硫化方式具备较高的适配性。CS₂可在适宜温度条件下与H₂反应生成H₂S, 供催化剂活化使用。与煤气相比, CS₂反应路径单一, 硫释放过程清晰、可控, 且不含CO等杂质; H₂来源于装置余氢气或氮氢气体混合流, 纯度高、来源稳定、压力可控。

该工艺还可通过流量计与阀门控制系统精确调节CS₂加入量, 避免过量生成H₂S或反应剧烈带来的安全风险。从操作简便性、安全性与环保性角度看, H₂+CS₂联合硫化具有良好的工艺适应性。

1.3 新工艺对装置运行及环保的预期影响

采用CS₂与H₂进行催化剂硫化可显著优化装置运行表现和环保指标。新工艺通过流量计与阀门组合精确调控反应速率, 硫化时间更短、操作窗口更宽, 适合装置大修后的启动阶段使用。在环保方面, 不再使用含硫煤气, 避免煤气中焦油、尘粒、CO等杂质对下游设备造成污染, 也大幅减少尾气处理压力^[1]。经密闭输送和局部抽风处理后, CS₂与H₂S排放可实现有效控制, 符合现行排放限值标准。此外, 改造工程量小、成本低, 便于现有系统快速适配升级。

2 氢气与CS₂输送管线的施工设计

2.1 H₂管线施工技术方案与流程设计

H₂管线的设计依托现有40#合成氮氢气管线, 选取其倒淋阀位置为引出点, 通过新敷设管线与变换装置连接, 实现定向输送氢气至V0901气

液分离罐。施工流程包括预制管道与配件、开孔作业、连接阀组与盲板、完成压力试验及密封测试，变换催化剂硫化氢气管廊如图 1 所示。施工全程应遵循压力管道安装规范，管道选用 11/2" SCH160 碳钢无缝管，连接采用法兰 + 焊接方式，部分关键部位配置止回阀与闸阀以便切断与倒空操作^[2]。整个流程在装置停工状态下进行，确保系统调试安全无泄漏。

2.2 CS₂ 管线布局与流量控制配置

CS₂ 输送管线设计基于现有 4[#] 气液分离罐 V0904 作为 CS₂ 容器，不另设储罐，直接从其底部冷凝液排液口导出两路 ϕ 25 mm 不锈钢管道，经针型阀与转子流量计定量控制后引入至变换装置的两个关键混气节点。CS₂ 注入点选取加热器 E0914 后与二段炉 R0902 入口压力表阀门根部，确保混合反应前反应区均匀进料。流量控制范围为 0 ~ 250 L/h，满足分段逐步升温硫化过程需求。该布置形式短小精悍、路径清晰，有利于运行监控及检修维护。

2.3 材料选型与设备匹配说明

H₂ 与 CS₂ 输送系统设计需同时兼顾压力耐受性、腐蚀防护性与防泄漏要求，H₂ 和 CS₂ 管线施工安装见表 1。H₂ 管道部分选用 20G 材质的碳钢管，配套高压等级的闸阀、止回阀及盲板组件，并采用 35CrMo 高强度全螺栓螺柱提升法兰连接强度。CS₂ 管道部分选用 304 不锈钢，具备良好耐腐蚀性能，主要使用 3/4" 管径以满足流量需求。关键控制点如针型阀及流量计均选用 316L 材质，适应 CS₂ 挥发性与腐蚀性特征^[3]。各类连接件与密封垫片匹配符合压力等级要求，并优先选用螺纹 + 法兰组合形式，提升系统稳定性与维修便捷性。

3 施工组织与安全控制措施

3.1 施工计划安排与作业分工

为保障施工效率与作业安全，施工组织需科学安排。整个施工工作分

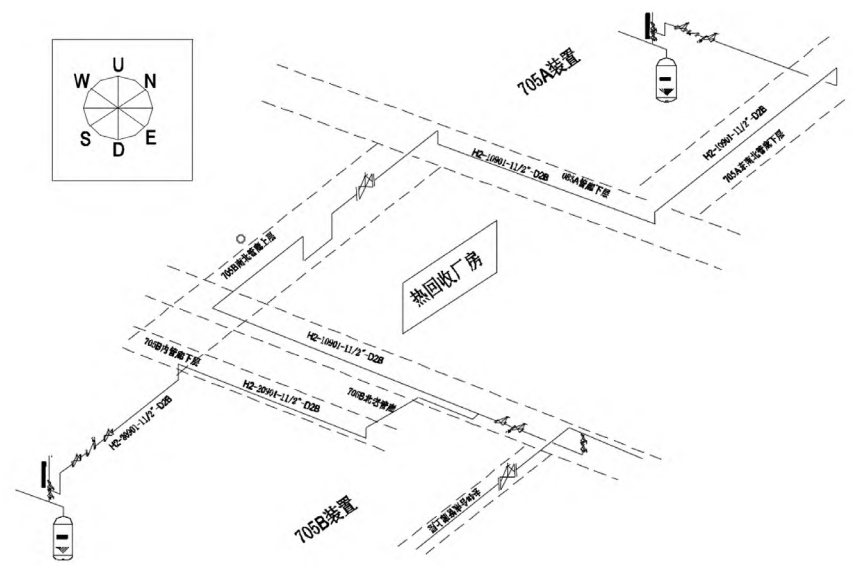


图 1 变换催化剂硫化氢气管廊图

表 1 H₂ 管线施工安装

序号	材料名称	规格	材质	数量
1	无缝钢管	11/2" SCH160	20G	500
2	90° 弯头	11/2" SCH160	20	60
3	闸阀	11/2" 600LB	A105/HF	3
4	闸阀	3/4" 600LB	A105/HF	3
5	截止阀	11/2" 600LB	A105/HF	3
6	止回阀	11/2" 600LB	A105/HF	2
7	8 字盲板	11/2" BLF1-10.0, FF	304	3
8	法兰	SW40-600, RF	16Mn	12
9	垫片	D40-600	2424	15
10	全螺栓螺柱	M20 × 120	35CrMo	40
11	全螺栓螺柱	M20 × 138	35CrMo	20
12	螺母	M20	30CrMo	120
13	等径三通	11/2" × 11/2" × 11/2", SCH160	20G	1

表 2 CS₂ 管线施工安装

序号	材料名称	规格	材质	数量
1	无缝钢管	3/4", SCH40S	304	300
2	90° 弯头	3/4", SCH40S	304	20
3	截止阀 (针型阀)	J23W-320P, DN20	304	6
4	转子流量计	口径: 3/4" 300Lb, RF; 量程: 0 ~ 0.25m ³ /h	椎管: 316L, 转子: 316L, 法兰: 316L	2
5	缠绕垫	D20-600	2222	5

为准备阶段、管道预制、现场安装、系统联调与验收 4 个阶段，采用“分段预制 + 现场组合”的方式进行。各施工小组职责明确：技术组负责图样审查与技术交底、管道组负责预制与焊接、仪表组负责流量计与阀门安装、安全组负责现场监护与风险评估。施

工期间严格执行交叉作业管控和高处动火作业申请制度，确保施工质量与施工人员人身安全。作业前后开展交接与检查，形成闭环管理。

3.2 危险作业环节风险识别与控制

H₂ 与 CS₂ 均为高危险性气体，其中 H₂ 为易燃易爆气体，CS₂ 具强挥发

性与毒性。施工过程中的关键风险包括：动火作业引发爆燃、管道残留气体泄漏、施工人员中毒暴露等。为应对上述风险，制定专项作业指导书与风险评估清单，设置动火、盲板拆装、导淋连接等关键作业的审批制度，并设立隔离区与应急撤离通道。变换催化剂硫化氢流程如图2所示，作业前进行气体置换与残压确认，施工区域配备便携式H₂S与CS₂检测仪，确保一旦泄漏可迅速响应与封控。

3.3 H₂与CS₂施工安全、泄漏防控及防爆设计

为确保H₂与CS₂系统在施工与后续运行阶段的本质安全，必须从设计与现场执行两个层面强化防控。在系统设计上，所有法兰连接处增加8字盲板与泄压阀，关键节点设止回阀防止逆流，安装过程中进行全面氮气置换与试压检测，确保无泄漏后方可投运。现场施工区采用防爆工具、防静电工作服、设置警戒线及明确作业负责人^[4]。CS₂区域设置导静电接地与常闭风机，避免积聚爆炸性混合气体。

双人作业制与岗位互检制度也是降低现场突发风险的重要措施。

4 硫化过程中硫化氢泄漏影响因素分析

4.1 装置工况波动的影响

硫化氢泄漏在硫化过程中常因装置运行状态不稳而加剧。催化剂硫化阶段通常位于装置重启初期，系统尚未形成热平衡与流量稳定状态，气相组分与压力波动频繁，易导致H₂S瞬时浓度激增。气体注入节奏控制不当时，CS₂可能局部过量，与H₂反应生成的H₂S超出装置吸收处理能力，从而经排气系统泄漏。此外，热交换效率波动也会影响反应区温度，进一步加大气体生成量的不确定性。在工况调节与气体注入逻辑方面需强化控制精度，尽量避免负荷突变与流程干扰，减少硫化初期的泄漏风险。

4.2 现场环境与气流扰动因素

在复杂工艺区域，局部风速、气流扰动及密闭程度直接影响H₂S泄漏后的扩散路径与浓度感知。若泄漏发生在空

气流通性较差或有“死角”区域，如泵房、地下管廊及装置支架阴影区，H₂S易积聚形成局部高浓度，传感器响应滞后或检测盲区频现，增加误报与漏报概率。同时，自然风与鼓风系统若不合理配置，可能将微量泄漏气体吹向人员作业区，加剧暴露风险。合理优化监测点布局、高度与通风方向，并通过烟雾试验等方式动态评估气体扩散行为，是提升检测效率的有效手段。

4.3 检测系统布局与设备老化问题

硫化过程中H₂S检测依赖于气体报警器的布点密度与反应灵敏度。若传感器布设过远或位置偏高，无法有效捕捉气体初始泄漏点，造成响应延迟。同时，部分传感器因长周期运行未及时标定，或因探头老化导致灵敏度下降，容易出现“有泄漏无报警”的失效现象。装置区中存在多源异构报警系统时，如不同厂家、不同技术原理混用，也会影响数据一致性和判断准确性。应强化检测系统的周期校准机制，统一报警设定阈值，优先采用双

(下转第25页)

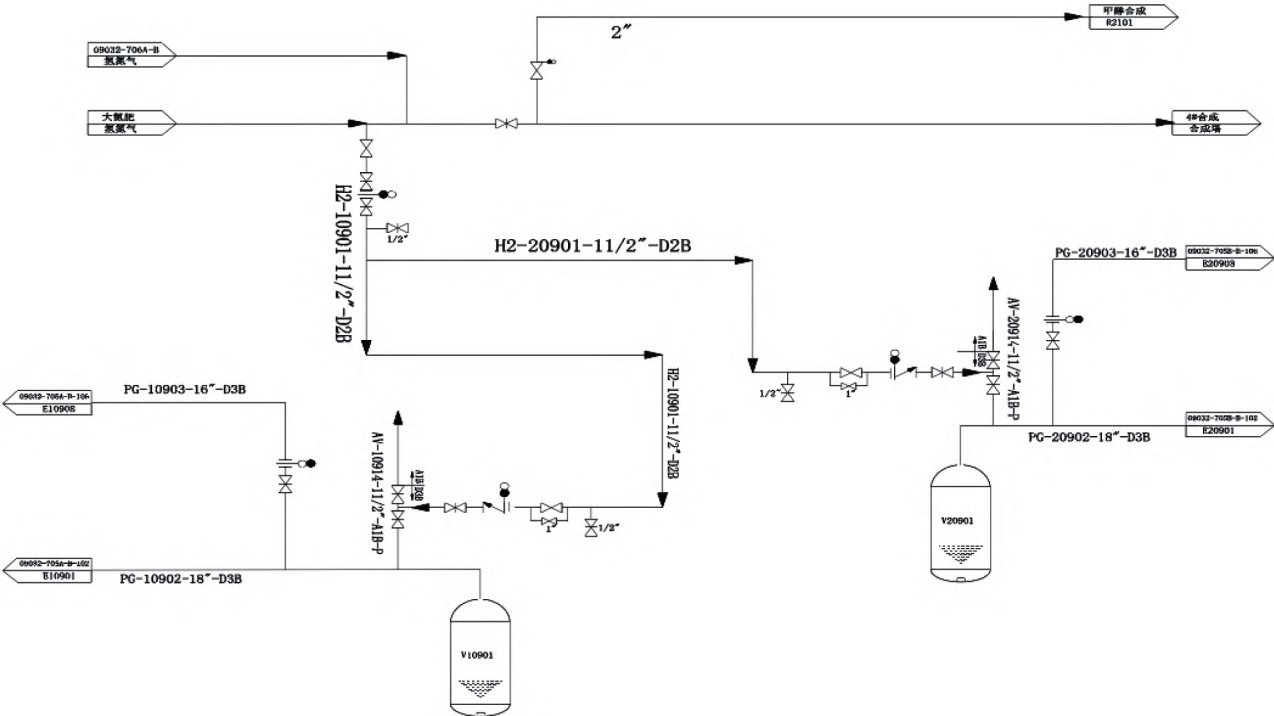


图2 变换催化剂硫化氢流程图

实施本次串联系统改造,有效节约了后续独立施工所需的停产成本。其次,改造后系统具备负荷自动调节与检修互备功能,可在每次单装置停运时保障全系统连续生产,预计每年可减少产能损失近 500 万元。同时,系统运行更为稳定,减少了因压力波动、跳车带来的设备损耗与能耗波动,间接降低了维保与能耗成本。在综合运行效益方面,串联系统提高了装置的整体利用率与管理弹性,提升了设备平均无故障运行时间(MTBF)约 18%,运行组织更加高效有序。

综上所述,本次改造不仅技术可行,经济上亦具良好投入产出比,具备显著的推广与复制价值。

5 结语

通过对 705A 与 705B 变换装置工艺气管线的串联改造实践,可以看出在不改变既有系统结构的前提下,通过合理设计与科学施工组织,即可实现系统间的有效联通与运行优化。

此次改造,不仅增强了两套变换系统的互为冗余能力,也显著提升了系统在复杂工况下的应急响应效率与调节弹性。从改造后运行数据看,系统运行稳定性提升明显,产能利用率更高,运维成本有效降低,具备较强的技术推广与经济复制价值。

参考文献:

[1] 张颂,王磐,郭大方. 合成气制甲醇

合成系统工艺优化[J]. 山西化工, 2025, 45 (03): 135-136+202.

- [2] 程佳,李开冉,吴彬. 超临界CO₂流化床换热器优化设计研究[J]. 流程工业, 2025(01): 78-81.
- [3] 党伟. 空分装置贫氮氩液氧系统工艺流程简述及调试总结[J]. 低温与特气, 2024, 42 (05): 41-42+45.
- [4] 罗鹏,梁锋,李斌. 氯气吸收系统的工艺改造与设计[J]. 氯碱工业, 2024, 60 (10): 22-24.
- [5] 任莉. “反渗透+离子交换”脱盐水处理系统的处理工艺及实用性验证[J]. 纯碱工业, 2024(05): 6-9.

(上接第21页)

技术(红外+电化学)复合检测模式,提高抗干扰能力和精准判断水平。

5 检测优化与环保融合策略

5.1 检测系统布点优化与多技术融合

为提高硫化氢泄漏检测的准确性与响应效率,有必要对现有监测系统布点进行布点优化与技术融合。首先,在气体可能积聚的低洼区、风向下风侧、设备密集处应设立重点监测点,合理布设不同高度的多层检测节点。

其次,采用红外光谱与电化学传感器复合应用模式,可增强系统对 H₂S 的识别灵敏度与抗干扰能力。此外,针对复杂场景还可引入激光遥感扫描技术或便携式监测设备,用于应急响应与区域补测。通过统一系统平台管理各类传感器数据,可实现报警联动与智能诊断,为快速决策提供支持。

5.2 泄漏吸收与尾气处理装置配置建议

在硫化过程中,除提升检测水平外,还应强化对硫化氢等有害气体的吸收与处理。针对装置中可能出现的微量泄漏或排放点,建议安装碱液吸收塔、小型

碳滤塔或尾气洗涤装置,对排出气体进行就地净化。同时,可设置局部抽风罩,配合负压引流系统,将反应区尾气导入中和处理模块。针对 H₂S 因高挥发性带来的二次污染风险,也应设专用收集与冷凝回收系统,减少其进入大气的概率。通过治理设备的模块化部署,可在不大幅增加改造成本的前提下有效提升环保控制能力。

5.3 数据平台联动与实时监测预警系统设计

实现对 H₂S 泄漏的全周期风险管理,需构建覆盖装置区域的实时监控与智能预警系统。建议部署一套具备数据采集、动态评估、风险研判功能的数字平台,集成各点位气体检测数据、风速气象数据与工况信息,形成三维可视化监控画面。当某点气体浓度接近预警阈值时,系统可自动发出声光报警,并联动通风、切断等应急装置启动。

6 结语

石化行业在追求生产高效与安全

运行的同时,必须高度重视特殊工艺阶段中的环境风险与泄漏隐患。本文围绕催化剂硫化工艺中氢气与 CS₂ 联合应用的可行性,从装置施工、泄漏影响因素到环保融合进行了全流程研究。实践表明,通过优化管线布局、精准控制注入节奏、强化泄漏监测系统建设,能够有效提升预硫化过程的安全性和环保水平。

参考文献:

- [1] 陈晓丹,刘艺璇. 强化责任勇担当 凝心聚力铸精品[N]. 克拉玛依日报, 2025-01-08 (009).
- [2] 王永嘉. 石化企业重质油储运过程中的安全与环保管理[J]. 石化技术, 2024, 31 (12): 342-344.
- [3] 刘守瑜. 数字化技术赋能石油石化安全环保技术服务研究[J]. 石化技术, 2024, 31 (11): 348-350.
- [4] 全力以赴为美好生活“加油”——中石化济宁石油分公司安全环保这样干[J]. 中国环境监察, 2024(10): 95-98.