



图1 智能实时监测和预测预警

## 4 智能化控制与安全运行的优化策略

### 4.1 系统集成与信息共享

化工生产控制系统及安全管理系统整合是加强安全运行的有效途径之一。利用DCS、SCADA、MES等控制系统采集的数据以及安全监控、预警、风险管理平台进行融合,消除信息孤岛现象,做到工艺控制、设备状况、安全风险信息的一体化管理,领导层可以根据即时性信息迅速做出生产及安全保障措施。融合之后系统能在出现问题的时候自动启动应急预案和执行计划,加快应急处理的速度和效率。

实时数据接入与分享给予运营生产强力支撑依据。依托工业互联网,大数据平台等技术手段,汇集生产、设备、隐患等多重来源的数据,运用单一引擎进行整合运算,打造可视化的决策辅助页面,让管理者一目了然生产及安全生产状况。数据共享增强了预警水平也为后序智能化提升及应急处置提供了可靠参考。

### 4.2 工艺优化与风险防控结合

智能化算法对于生产工艺优化有着决定性的影响,通过对于加工参数以及控制方式的学习及建模可以直接得出最合理的工艺参数设定从而使得生产更加平稳、高效;针对过往经验的学习模型可以在运行过程中实时调节诸如温度、压力、流速等一系列重要指标让整个装置处于更为可靠经济运转的状态下,并降低人为主观干预带来的风险与失误概率。

把风险管理融合进生产工艺当中是一种提高安全保障的有效方法。提前识别出存在隐患的苗头并加以警报,对即将成为灾难而尚未发生的事件进行预防,提前调节相关控

制变量或者触发应急连锁装置。如基于大数据挖掘技术对温度、泄露变化趋势进行分析,可提早启动降温减压停车等操作措施来避免事故发生。从而大大减少事故发生的几率。

### 4.3 技术与管理协同发展

建立人机协作的操作模式可以充分利用自动化的系统以及人工操作的优点相互补充,智能控制系统利用自动化的决策和执行来降低基本性的操作错误,人在现场则能及时从显示器得到系统状况及意见,在出现突发状况的时候作出更快也更精确的干预,人机协作提高了生产力也提升了整个安全监控系统的即时反应时间。

培训及安全文化宣传教育也是保障技术落实的重要条件之一,在对系统进行培训的同时,使大家了解清楚智能系统的工作方式以及警报信息处理程序还有应急预案等知识,从而提高全体人员的安全观念以及技术水平。同时还要定期更新迭代技术与不断优化,企业才能跟上新型智能技术的步伐,使得新技术和管理模式相结合,形成一个稳定的长期有效的安全运维体系。

## 5 结语

智能控制技术应用于化工领域的全过程监测自动化控制和预控维修管理极大地提高了生产能力及产品质量;基于安全管理智能控制体系对重大风险有效把控降低了事故发生频率;通过系统集成、信息互通以及算法升级使得生产环节高产且可靠;配合着人机配合工作流程、教育训练、不断完善,在技术及管控方面构建起了完整的闭环体系支持了化工产业的安全、高效与绿色发展。

### 参考文献

- [1] 李连星,陈振生,林祥春.智能化搅拌设备在化工生产中的集成控制应用[J].造纸装备及材料,2025,54(07):49-51.
- [2] 孙乐朋,陈泰利,张磊.化工安全生产中智能化过程控制的应用及优化[J].化工管理,2022,(08):99-101.
- [3] 陈小波.筑牢化工安全防线——自动化控制及安全联锁机制的关键应用[J].中国石油和化工,2025,(04):94-96.
- [4] 毛永星.化工安全生产中的智能化过程控制[J].化工管理,2022,(36):102-104.

# Construction of a Safety Evaluation System for the Methanol Synthesis Unit Based on HAZOP

Huitao Sun

Henan Pingmei Shenma Group Shoushan Carbon Materials Co., Ltd., Xuchang Henan, 461713, Chian

## Abstract

The methanol synthesis unit is the core production unit in the methanol production plant with the most severe process conditions and the highest concentration of hazardous characteristics. It possesses multiple high-risk attributes such as high temperature, high pressure, strong exothermic reactions, flammability, explosiveness, and toxicity of materials. Even slight deviations in process parameters can trigger uncontrolled reactions, equipment overpressure, medium leakage, or even fires and explosions leading to major accidents. Hazard and Operability Analysis (HAZOP), as a standardized risk identification tool in chemical process safety, can systematically identify process deviations, causes of hazards, accident consequences, and existing protection gaps, providing critical data support for constructing a scientifically precise safety evaluation system. This paper takes the methanol synthesis unit as the research object, systematically analyzes the unit's process flow, process characteristics, and hazard features, standardizes the HAZOP analysis and full-process risk identification, and clarifies the key risk nodes and high-risk scenarios of the unit. Based on the HAZOP analysis conclusions, and integrating the risk matrix method and the analytic hierarchy process, a specialized safety evaluation system for the methanol synthesis unit is constructed, covering risk identification, level assessment, indicator quantification, prevention and control optimization, and continuous improvement. The paper details the system architecture, construction principles, evaluation indicators, evaluation models, and standardized implementation procedures, and proposes measures to ensure the system's practical application.

## Keywords

Methanol Synthesis Unit; HAZOP Analysis; Process Safety; Safety Evaluation System

## 基于 HAZOP 的甲醇合成工段安全评价体系构建

孙汇涛

河南平煤神马集团首山碳材料有限公司, 中国·河南许昌 461713

## 摘要

甲醇合成工段是甲醇生产装置中工艺条件最苛刻、危险特性最集中的核心生产单元, 具有高温、高压、强放热、物料易燃易爆与有毒等多重高危属性, 工艺参数微小偏离即可能诱发反应失控、设备超压、介质泄漏乃至火灾爆炸等重特大安全事故。危险与可操作性分析 (HAZOP) 作为化工过程安全领域标准化风险辨识工具, 能够系统识别工艺偏差、致险原因、事故后果与现有防护短板, 为构建科学精准的安全评价体系提供关键数据支撑。本文以甲醇合成工段为研究对象, 在系统剖析工段工艺流程、工艺特性与危险特征的基础上, 规范开展HAZOP分析与全流程风险辨识, 明确工段关键风险节点与高风险场景; 以HAZOP分析结论为核心依据, 融合风险矩阵法与层次分析法, 构建集风险辨识、等级评估、指标量化、防控优化、持续改进于一体的甲醇合成工段专用安全评价体系, 详细阐述体系架构、构建原则、评价指标、评价模型与标准化实施流程, 并提出体系落地运行保障措施。

## 关键词

甲醇合成工段; HAZOP分析; 工艺安全; 安全评价体系

## 1 引言

在现代煤化工产业规模化、集约化发展格局下, 甲醇已成为连接化石能源、清洁能源与高端化工新材料的关键中间体, 我国甲醇产能与消费量长期位居全球首位, 煤制甲

醇、焦炉煤气制甲醇等主流技术路线持续优化升级。甲醇合成工段作为决定装置稳定运行、产品质量与产能水平的核心环节, 通常在 5 ~ 15MPa 高压、220 ~ 300°C 高温条件下, 以 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub> 为原料在铜基催化剂作用下发生强放热催化反应, 对反应压力、床层温度、氢碳比、空速、循环气量等关键参数控制精度要求极高。工段内甲醇、合成气均属于甲类易燃易爆危险化学品, 甲醇蒸气爆炸极限为 6.0% ~ 36.5%, 一氧化碳同时具有高毒性, 一旦出现泄漏、

【作者简介】孙汇涛 (1988-), 中国河南叶县人, 本科, 中级, 从事化工安全研究。

超温超压、反应失控等异常工况,极易引发火灾、爆炸、人员中毒等安全事故,造成严重人员伤亡、财产损失与环境影响。当前多数甲醇生产企业对合成工段的安全管理仍存在明显短板:风险辨识依赖经验判断,系统性与全面性不足;安全评价以定性为主,缺乏量化评价模型与统一评价标准;安全管控措施碎片化,未形成“辨识—评估—防控—改进”的闭环管理体系,难以满足现代化化工过程安全管理要求。HAZOP分析以“引导词+工艺参数”为核心逻辑,可实现连续化工工艺风险的系统化、结构化识别,是构建专业化安全评价体系的理想基础工具。

## 2 甲醇合成工段工艺特征与 HAZOP 分析基础

### 2.1 甲醇合成工段工艺流程与危险特性

甲醇合成工段一般由原料气进料与预处理、甲醇合成反应、热量回收、循环气回流、粗甲醇分离出料五个连续工艺单元构成,整体为密闭、连续、高压催化反应系统。原料气经脱硫、脱氯、脱砷等深度净化后,调整氢碳比至适宜范围,经压缩机升压后进入甲醇合成塔;在铜基催化剂作用下发生催化反应生成粗甲醇,反应伴随大量反应热释放,需通过副产蒸汽持续移热;反应后气液混合物进入分离单元,未反应完全的循环气返回合成系统,粗甲醇送至后续精馏工段提纯。

从安全角度,该工段具有典型高危特征,一方面是操作条件苛刻,高温高压工况使设备长期承受交变应力,易出现疲劳损伤、密封失效与泄漏;第二是反应强放热且失控风险高,移热不畅将迅速导致床层飞温、催化剂失活、系统超压;三是物料危险性突出,甲醇易燃易爆、有毒,合成气中CO、H<sub>2</sub>易燃易爆且CO可引发急性中毒;四是系统耦合性强,单一参数异常可快速扩散为全系统工况紊乱,诱发连锁事故;最后是催化剂敏感性高,微量硫、氯、砷杂质即可造成催化剂永久性中毒,引发运行异常与安全风险。

### 2.2 HAZOP 分析原理与实施步骤

危险与可操作性分析(HAZOP)是一种适用于连续化工工艺的结构化风险辨识方法,通过引导词与工艺参数组合,系统识别工艺系统偏离设计意图的偏差,逐一分析偏差产生原因、可能导致的事故后果、现有安全保护措施,并提出风险减缓建议,具有辨识全面、逻辑性强、过程规范等优势,是化工高危工段风险辨识的首选技术。甲醇合成工段HAZOP分析按照标准化流程分为两个核心阶段,第一阶段为分析准备,收集P&ID管道及仪表流程图、工艺操作规程、设备参数、安全设施配置资料、历史异常事件记录等基础资料,组建由工艺、设备、仪表、安全、操作岗位构成的跨专业分析组,按照工艺流程连续性与设备功能独立性划分分析节点。第二阶段为偏差分析与结果汇总,采用“无、过多、过少、伴随、部分、异常、反向”等引导词,与流量、压力、温度、液位、成分、组分等参数组合形成偏差,逐项分析偏

差原因、后果、现有保护措施,形成HAZOP分析记录表;最终对全部偏差进行梳理归类,识别高风险偏差与关键薄弱环节,为安全评价体系构建提供基础风险数据。

## 3 甲醇合成工段 HAZOP 风险辨识与分析

### 3.1 工段工艺节点划分与偏差辨识

按照工艺流程与HAZOP分析要求,将甲醇合成工段划分为原料气进料节点、合成塔反应节点、热量回收节点、循环气回流节点、粗甲醇出料节点五大核心分析节点,覆盖工段全部工艺环节与关键设备。

原料气进料节点主要偏差包括无进料、流量过高/过低、压力异常、温度异常、组分(氢碳比)失调、杂质超标等,主要致因为阀门故障、压缩机异常、预处理单元失效、管线堵塞等,可能造成催化剂中毒、反应工况紊乱、系统波动等风险。

合成塔反应节点是风险最集中的核心节点,主要偏差包括压力过高/过低、床层温度过高/过低、温差过大、氢碳比异常、空速异常等,偏差可直接诱发反应飞温、催化剂失活、合成塔超压、介质泄漏、火灾爆炸等高风险。

### 3.2 风险后果分析与现有防护效能评估

基于HAZOP偏差辨识结果,可将甲醇合成工段风险后果归纳为六大类型:反应失控风险、设备失效风险、介质泄漏风险、火灾爆炸风险、中毒窒息风险、生产中断风险。其中,反应失控与介质泄漏是最易诱发重特大事故的原发风险,火灾爆炸与中毒窒息是最严重的次生风险,设备失效与生产中断则是企业最常见的风险后果。

对现有安全防护措施进行系统性评估可知,甲醇合成工段已配置DCS集中监控、超限声光报警、安全阀/爆破片超压泄放、紧急切断阀、ESD紧急停车系统、可燃/有毒气体检测报警、消防与应急处置设施等常规保护措施,但仍存在明显短板:部分高风险偏差缺乏独立保护层;联锁逻辑设计未完全覆盖所有HAZOP关键偏差;安全设施运行状态缺乏量化评价;人为操作与管理因素未纳入系统性风险评估,整体防护呈现“被动应对多、主动预防少”的特征。HAZOP分析清晰揭示了现有防护体系的薄弱环节,为安全评价体系突出评价重点、优化指标权重提供了直接依据。

## 4 基于 HAZOP 的甲醇合成工段安全评价体系构建

### 4.1 评价体系构建原则与整体架构

以HAZOP分析结论为核心依据,构建甲醇合成工段安全评价体系,遵循四项基本原则:

一是针对性原则,紧密贴合高温高压、强放热、易燃易爆、催化剂敏感的工段特性,指标与权重向HAZOP识别的高风险节点倾斜;第二是科学性原则,以HAZOP结构化辨识为基础,融合风险矩阵与层次分析法,保证评价逻辑严谨、模型规范;三是可操作性原则,评价指标数据易于现