

Research on Process Risk Analysis and Safety Prevention and Control Measures of Methanol Plants

Huitao Sun

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

Abstract

Methanol occupies a fundamental raw material position in the modern coal chemical industry system. Its production units have distinct high-risk characteristics, including long process flows, harsh operating conditions, pronounced material flammability and toxicity, and high system interconnectivity, making safety management challenging at a relatively high level in the chemical industry. To further strengthen full-process risk management effectiveness in methanol production and improve the inherent safety level of the units, this paper takes widely used coal-to-methanol and coke oven gas-to-methanol processes as research objects. Based on a systematic review of typical production processes and operational features, HAZOP and FMEA combined analysis methods are applied to identify hazards and quantify risk levels in key units such as synthesis gas preparation, methanol synthesis, distillation separation, and product storage and transportation, clarifying the distribution characteristics of major hazard sources and high-risk loss-of-control scenarios. Following the safety governance approach of source reduction, process control, and emergency backup, a safety prevention and control framework covering the entire lifecycle of unit design, construction, operation, and maintenance is established from two levels: process inherent safety improvement and key technical protection, and the construction of safety management systems and emergency preparedness. Targeted and practical safety technical solutions and management measures are proposed.

Keywords

Methanol production unit; process safety risk; hazard identification; risk assessment

甲醇装置工艺风险分析及安全防控措施研究

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

甲醇在现代煤化工产业体系中占据基础性原料地位,其生产装置具有工艺流程长、工况条件苛刻、物料燃爆毒性突出、系统关联度高等显著高危属性,安全管控难度处于化工行业较高水平。为进一步强化甲醇生产全流程风险管控效能,提升装置本质安全等级,本文以较为普遍的煤制甲醇及焦炉煤气制甲醇工艺为研究对象,在系统梳理典型生产流程与运行特点的基础上,运用HAZOP与FMEA联合分析手段,对合成气制备、甲醇合成、精馏分离及产品储运等关键单元开展危险有害因素识别与风险等级量化研判,明确装置重大危险源分布特征与高风险失控情景。遵循源头消减、过程管控、应急兜底的安全治理思路,从工艺本质安全改良与关键技术防护、安全管理体系构建与应急保障建设两个层面,搭建覆盖装置设计、建设、运行及检维修全生命周期的安全防控框架,提出具备针对性与可操作性的安全技术对策与管理举措。

关键词

甲醇生产装置; 工艺安全风险; 危险辨识; 风险评价

1 引言

在现代煤化工产业规模化、集约化持续推进的大背景下,甲醇产业产能与产量规模长期位居全球前列,产品应用场景不断向甲醇制烯烃、清洁燃料、有机合成及新能源领域延伸,已成为支撑国家能源化工体系平稳运行的关键基础化学品。甲醇生产装置以合成气制备、催化合成、精馏提纯、产品储存与输送为主体流程,全流程伴随高温、高压、易燃、易爆及有毒有害等多重危险属性,甲醇蒸气爆炸极限区间在

6.0%~36.5%左右,闪点仅11℃,系统内氢气、一氧化碳、硫化氢等介质同时具备强烈燃爆性与人体毒害性,单一设备失效或工艺参数偏离均有可能引发泄漏、火灾、爆炸及中毒窒息等重特大安全事件,造成人员伤亡、财产损毁、环境破坏与负面社会影响。

当前甲醇行业在安全运行层面仍面临诸多现实问题,部分装置本质安全设计水平偏低,老旧设备设施存在老化劣化隐患,企业风险辨识工作系统性与全面性不足,安全防控措施呈现碎片化特征,安全管理模式与现代化工艺运行要求匹配度不高,传统事后处置型安全管理难以满足新时代化工安全生产管控标准。开展甲醇装置全流程工艺风险系统化分

【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。

析,构建科学完备、层级清晰、协同联动的安全防控体系,有助于推动风险管控从事后应对向事前预防转型、从局部管控向系统治理升级、从经验管理向精准施策跨越,对保障甲醇装置长周期安稳运行、化解重大安全风险、提升煤化工行业整体本质安全水平具备重要理论意义与实践价值。

2 甲醇装置工艺特征与风险辨识基础

2.1 典型工艺流程与运行特性

甲醇工业化生产以煤制甲醇、焦炉煤气制甲醇为两大主流技术路线,整体工艺流程高度相近,均由四大核心工序串联构成,各工序运行工况与风险特点差异明显。煤制甲醇以煤炭为原料,经气化反应生成粗煤气,通过变换工序调整氢碳比例、脱碳工序脱除酸性组分后获得合格合成气;焦炉煤气制甲醇以炼焦副产焦炉煤气为原料,经脱硫、脱苯、精制提纯后获得满足反应条件的合成气,两类工艺后续均进入甲醇合成、精馏提纯及产品储存输送环节,最终产出符合国家标准精甲醇产品。合成气制备工序为前置关键单元,煤制煤气化炉运行温度可达1300~1500℃,操作压力3~8MPa,设备长期处于高温冲刷与介质腐蚀环境,焦炉煤气预处理则要求将硫含量控制在0.1ppm以下,对净化精度要求严苛;甲醇合成工序属于强放热催化反应过程,操作压力5~15MPa、反应温度200~300℃,氢碳比、温度、压力等参数控制精度要求高,是全装置风险最为集中、事故后果最为严重的核心单元;精馏提纯工序采用多塔连续精馏实现甲醇与水、杂醇油等杂质分离,塔器、换热器、机泵类设备数量多,静密封点分布密集,易出现超压、液泛、介质泄漏等异常工况;产品储存输送工序多采用常压或低压储罐储存甲醇,通过管道及装卸设施完成物料输送,静电积聚、挥发性气体聚集、密封点泄漏为主要风险表现形式。

2.2 风险辨识方法与危险有害因素分类

为实现甲醇装置风险全面、精准、无遗漏识别,本文采用HAZOP危险与可操作性分析结合FMEA故障模式与影响分析的组合辨识模式,HAZOP分析面向连续工艺流程,以引导词搭配工艺参数识别系统偏离、诱发原因、事故后果及现有防护措施,FMEA分析面向设备、仪表、阀门、密封结构等关键部件故障模式,实现工艺流程系统风险与单体设备部件风险双重覆盖,同时开展重大危险源判定,保障风险辨识结果科学严谨、贴合生产实际工况。

按照危险来源与作用形式,将甲醇装置危险有害因素划分为两大类:第一类是为物料本身固有的危险特性,甲醇、氢气、一氧化碳、硫化氢等均属于甲类易燃易爆危险化学品,遇到明火、静电、高温表面、摩擦火花等点火能量即可发生燃烧爆炸,一氧化碳与硫化氢可经呼吸道侵入人体造成急性中毒甚至死亡,甲醇可通过皮肤接触、呼吸吸入对人体神经系统及代谢系统产生损害;第二类为工艺与设备相关危险性,包括高温高压引发设备超压破裂、反应热量积聚失控,介质腐蚀、疲劳损伤造成设备管线失效泄漏,仪表失灵、

联锁失效导致关键参数失控,静电、雷击、公用工程中断诱发系统性风险,以及人员误操作、特殊作业不规范带来的人为管理风险,各类风险相互耦合、交叉影响,易形成连锁性安全事故。

3 甲醇装置工艺风险分析与评估

3.1 全流程核心工序风险辨识

甲醇合成工序为全装置风险等级最高单元,反应过程放热量大,对原料气氢碳配比、冷却水量、催化剂活性敏感度高,一旦出现氢碳比失衡、冷却系统故障、催化剂结焦失活等情况,极易造成反应热量无法及时移出,引发合成塔超温超压,导致设备塑性变形、焊缝开裂、密封结构失效;合成系统高压法兰、阀门、管件密封点数量较多,长期在交变工况下运行易出现密封面损伤、垫片老化失效,造成甲醇及合成气持续性泄漏,泄漏气体与空气混合形成爆炸性混合气,在点火源作用下可迅速发生空间爆炸;原料气中硫、氯、砷等微量杂质超标会造成催化剂永久性中毒失活,不仅会造成生产运行中断,还可能引发系统压力波动与工况紊乱。

合成气制备、精馏提纯与储存输送工序同样存在不容忽视的系统性风险。合成气制备单元中,煤气化炉炉管与炉壁长期受高温熔渣与高速气流冲刷,易出现壁厚减薄、烧穿、开裂等缺陷,变换与脱碳设备长期接触酸性介质,发生均匀腐蚀与应力腐蚀的概率较高,粗煤气泄漏可同时引发火灾爆炸与人员中毒双重风险;精馏单元回流比、加热蒸汽量、进料流量控制失调易造成塔内液泛、压力骤升,再沸器与冷凝器换热效率下降会导致塔内温度分布失常,加剧设备腐蚀与介质泄漏风险;储存输送单元中,储罐氮封系统失效会造成甲醇挥发性气体在罐顶聚集,形成爆炸性危险环境,输送管线流速控制不当会加剧静电积聚,机泵密封、法兰连接部位为泄漏高发点位,装卸作业操作失误可进一步扩大事故影响范围。

3.2 风险等级评估与重大危险源界定

本文采用风险矩阵法与风险优先数RPN相结合的方式开展风险等级量化评价,风险优先数计算公式为: $RPN = \text{事故发生概率}(O) \times \text{事故严重程度}(S) \times \text{故障检测难度}(D)$,按照RPN数值将风险划分为高、中、低三个等级, $RPN \geq 100$ 为高风险, $50 \leq RPN \leq 99$ 为中风险, $RPN < 50$ 为低风险。经系统性评价,甲醇合成塔超温超压、合成气高压泄漏、催化剂中毒失活、气化炉烧穿、甲醇储罐区泄漏等情景RPN值均处于高风险区间,为装置安全管控核心重点;精馏塔超压、设备管线腐蚀减薄、机泵密封泄漏等归为中风险,一般仪表偏差、轻微结垢堵塞等划分为低风险。依据危险化学品重大危险源辨识标准,结合甲醇装置物料储存量、压力等级及危险特性,对装置重大危险源进行界定与分级:甲醇储罐区、甲醇合成反应系统、合成气储罐区、精馏系统均构成危险化学品重大危险源,其中甲醇合成系统与甲醇储罐区物料储存量大、压力等级高、事故后果极端严重,划定

为一级重大危险源；精馏系统与合成气储罐区风险后果相对可控，划定为二级重大危险源。

4 甲醇装置安全防控措施

4.1 工艺本质安全优化与技术防控措施

本质安全优化是甲醇装置风险源头防控的根本路径，通过工艺方案设计、设备选型、流程简化从根源降低危险物料在线量与失控可能性。工艺设计阶段优先选用等温反应器、高效内冷式合成塔，保障反应热量稳定移出，避免局部超温失控；采用持液量更低的微通道反应器、紧凑型换热设备，减少易燃易爆物料在线滞留量，大幅降低泄漏爆炸事故后果严重程度；优化工艺流程平面布局，减少非必要中间储罐与迂回管线，合理划分生产区、储存区、公用工程区，设置充足安全距离、防火堤与防爆隔离设施，遏制事故多米诺效应蔓延。

关键技术防控举措聚焦过程精准控制与异常工况紧急处置，构建多层次安全防护架构，设备设施层面，对合成塔、气化炉、压缩机、精馏塔等核心设备实施全生命周期检测与完整性管理，定期开展壁厚测量、无损检测、腐蚀监测，选用高强度密封组件与耐腐蚀材质，降低静密封点泄漏概率；安全附件层面，为高压设备规范配备校验合格的安全阀、爆破片、压力表、温度计、紧急切断阀，保障超压泄放与紧急隔离功能稳定可靠；监测监控层面，在泄漏高发区域、储罐区、机泵区设置可燃及有毒气体检测报警器、在线泄漏监测系统、静电接地监测装置，实现风险状态实时感知；自动化控制层面，搭建DCS集中控制系统与ESD紧急停车系统，对温度、压力、流量、液位、氢碳比等关键参数实现实时监控、超限报警与自动联锁保护，在异常工况下自动切断进料、启动紧急冷却与泄压程序，切断事故发展链条。

4.2 安全管理体系完善与应急保障防控措施

系统化安全管理是甲醇装置风险防控长效稳定的重要

支撑，以制度体系、人员能力、过程管控为核心构建全方位管理防控网络。建立健全工艺安全管理体系，完善设备操作规程、安全作业规程、变更管理制度、检维修管理制度、隐患排查治理制度，明确各层级、各岗位安全生产责任，严格落实安全生产责任制；强化从业人员安全技能培训教育，围绕工艺风险、操作要点、联锁逻辑、异常处置、应急逃生等内容开展常态化培训与实操考核，执行关键岗位持证上岗制度，杜绝无证上岗与违章操作；严格特殊作业安全管控，动火、受限空间、高处、吊装、临时用电等作业严格执行作业票审批制度，作业前开展风险识别与安全技术交底，落实气体检测、通风置换、现场监护等防护措施，严防违规作业诱发安全事故；建立常态化风险排查与闭环管理机制，定期开展全装置系统性风险识别与HAZOP复核，对隐患实行台账化管理、限期整改、复查销号，实现风险动态清零。

5 结语

甲醇装置属于典型高温高压、易燃易爆、有毒有害类危险化工装置，风险具备系统性、耦合性、突发性强等特征，主要风险集中于甲醇合成、合成气制备、产品储存输送三大核心单元，甲醇合成系统与甲醇储罐区为一级重大危险源，超温超压、介质泄漏、反应失控、催化剂中毒是最易诱发重特大事故的高风险情景。采用HAZOP与FMEA融合风险分析手段，能够全面识别全流程危险有害因素，结合风险矩阵法与RPN风险优先数开展定量评价，可科学划分风险等级、界定重大危险源，为实施精准化防控提供可靠依据。

参考文献

- [1] 张树才,张艳. 甲醇储罐区安全风险分析与应急处置措施[J]. 安全、健康和环境,2022,22(07):45-48.
- [2] 王建军,李丽. 化工装置安全仪表系统SIL定级与验证方法研究[J]. 自动化仪表,2021,42(08):76-80.
- [3] 吴宗之,多英全. 化工过程安全管理理论与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2021.