

煤化工装置工艺安全风险评估与技改优化研究

张敏

内蒙古黄河工贸集团千里山煤焦化有限责任公司，内蒙古 乌海 016011

DOI:10.61369/ERA.2026060040

摘 要： 本研究以煤炭化工过程为研究对象，以提高煤炭资源利用效率为目标。本研究拟以危害和操作性评价（HAZOP）和LOPA（LOPA）为手段，对煤气化、合成和提纯等关键流程进行综合评价。在评价过程中发现了一些重要的危险因素，如设备故障、材料泄漏、催化剂中毒、工艺参数波动等。在此基础上，从反应流程优化、控制方案优化、耐腐蚀材料选择、设备冗余设计和智能监控等方面，提出技术改造优化方案。

关 键 词： 煤化工装置；工艺安全；风险评估；技改优化

Research on Process Safety Risk Assessment and Technical Optimization of Coal Chemical Industry Plants

Zhang Min

Inner Mongolia Yellow River Industry and Trade Group Qianlishan Coal Coking Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia 016011

Abstract： This study focuses on coal chemical processes with the objective of enhancing the efficiency of coal resource utilization. It employs Hazard and Operability Analysis (HAZOP) and Layer of Protection Analysis (LOPA) as tools to conduct a comprehensive evaluation of key processes such as coal gasification, synthesis, and purification. During the evaluation, several significant hazards were identified, including equipment failure, material leakage, catalyst poisoning, and fluctuations in process parameters. Based on these findings, technical optimization plans are proposed in areas such as reaction process optimization, control scheme enhancement, selection of corrosion-resistant materials, equipment redundancy design, and intelligent monitoring.

Keywords： coal chemical industry plants; process safety; risk assessment; technical optimization

一、煤化工行业及装置概述

（一）煤化工行业特点

煤化工是我国经济发展的一个重要环节，对我国经济发展起着举足轻重的作用。随着我国经济的持续发展和工业体系的完善，化工行业在经济建设中的重要性日益突出，尤其是煤化工，其在化工行业中的地位煤化工行业是一个高风险行业，其生产工艺复杂、生产装置数量多、火灾爆炸危险性大、危险源多且复杂，一旦发生事故，其影响范围和后果往往是不可估量的^[1]。近年来，我国煤化工产业规模不断扩大，技术水平显著提升，已形成以煤气化、合成气转化、精细化学品合成为核心的完整产业链条。特别是在国家政策的支持下，新型煤化工技术得以快速发展，如煤制油、煤制天然气、煤制烯烃等项目相继投产，为缓解石油资源短缺压力、促进经济可持续发展提供了有力支撑^[2]。但是，在高速发展的同时，也面临着资源消耗大、环境污染大、安全风险大等一系列难题，迫切需要通过科学的管理与技术手段来解决。

（二）工艺安全的重要性

煤化工装置工艺安全是保障生产稳定运行、环境保护和人员安全的核心要素。由于煤化工生产过程具有高温高压、易燃易

爆、有毒有害等特点，其工艺系统的复杂性决定了安全管理的难度较大^[3]。一旦发生事故，不但会造成设备的损伤，而且会引起火灾、爆炸、中毒等次生灾难，给周围的环境和人民的生命财产带来巨大的危害^[4]。比如，煤炭气化过程所处的高温、高压环境和易燃、易爆等特点，大大提高了过程介质的泄漏风险；然而，在合成过程中，对温度和压力等条件有较高的要求，使得过程安全性显得尤为重要。加强对煤化工生产过程的安全管理，既是对企业社会责任的一种表现，也是对工业可持续发展的需要。

（三）安全风险评估方法研究现状

目前，我国煤炭行业普遍采用的危险性和可操作性分析（HAZOP）、保护层分析（LOPA）等，对煤炭行业的风险辨识和控制起到了很大的作用，但各有其局限性。HAZOP方法通过对生产过程中的偏差进行系统的分析，可以有效地发现与设计值不符而导致的安全隐患，并将其应用于煤制甲醇装置的低温甲醇洗过程。但是，HAZOP方法对人员的经验要求较高，缺乏对系统动力学特性的考虑。相比之下，LOPA方法通过定量分析保护层的有效性，能够更准确地评估风险等级，但其实施成本较高且需要大量的基础数据支持。此外，基于贝叶斯网络的动态风险评估技术在大型煤气化装置中的应用研究表明，该方法能够更好地处理系统的不确定性与动态变化，但其模型构建与参数学习过程较为

复杂^[4]。因此,安全风险评估可以帮助企业更快地了解风险性质、风险程度以及风险影响,为企业提供可靠决策数据,从而制定科学合理的风险管理措施,降低潜在风险对企业安全生产的影响^[2]。

二、煤化工装置工艺安全风险分析

(一) 煤气化工艺风险分析

煤气化过程中,高温、高压、材料特征等因素对气化过程的影响较大,总体安全隐患较大。由于整个过程都处在高温、高压的极端环境中,对设备的强度和密封性提出了极高的要求,在长时间的服役过程中,易发生蠕变、氧化和疲劳老化等现象,导致其力学性能退化^[3]。此外,气化炉和换热器等关键设备的失效往往具有突发性和灾难性的特点,极易导致材料泄露。此外,该过程介质含有易燃、有害的一氧化碳、氢气等气体,一旦泄露,容易引起火灾和爆炸,还可能导致人员中毒和窒息,虽然使用了高性能的密封材料和定期维护,但由于操作失误、事故等原因,仍然不能完全避免。另外,过程材料自身也具有很大的安全隐患,如煤粉和水煤浆在贮存和运输过程中,由于粉尘的含量超标,容易引起爆炸。

(二) 合成工艺风险分析

煤化学合成过程的核心安全风险是催化剂的风险和反应条件的控制。催化剂是保证反应效率和产物品质的的重要因素,但由于原料气体中存在的硫化物、氯离子等杂质,易发生烧结、积碳或毒性,导致反应速率下降,副反应增多,甚至引起局部温度过高,甚至出现热失控等安全事故,而杂质引起的中毒往往是永久性的、不可逆的^[4]。目前对其危害的控制手段主要是通过对原料气体进行预处理和定期检测来进行,但由于其故障机理复杂,尚不能对其进行实时、精确的监控。但是,由于反应温度、压力和流速等条件的苛刻,使得反应过程中的参数存在较大的波动。高温异常会加剧催化剂的烧结和副产物的形成,而压力失控则会引起装置超压,导致泄漏和爆炸。如果原料流不稳定,就会引起反应物的比例失调,从而引起反应的失控^[5]。

(三) 净化分离工艺风险分析

煤化学提纯与分离过程中,存在着两方面的安全隐患:一是对有毒有害物的处置,二是设备的腐蚀。合成气中的硫化氢、二氧化碳等杂质是脱硫脱碳的核心过程,如果不合理的话,很容易引起一系列的安全问题,如果不能及时处理好这些有害气体,就会导致尾气超标,有毒介质泄漏,对人体健康和生态环境造成威胁。该工艺使用的化工原料如醇胺等有泄露,也容易引起人体的化学烧伤。目前可以通过工艺优化、新型分离技术的应用和实时监控等手段来减少,但是复杂的反应条件很难对其进行全面的风险监控,仍然需要依靠智能监控和自动控制技术来提高其安全性^[6]。与此同时,设备的腐蚀也是这一过程的一项重要隐性隐患。生产过程中含有的硫化氢、二氧化碳等酸性气体,再加上湿气、高温高压和流体冲刷的影响,这些都会使设备的腐蚀速度加快,弯头、三通等部位容易发生局部腐蚀、壁厚减薄,容易造成设备穿孔、介质泄露等突发事件。

三、安全风险评估方法应用

(一) 选定评估方法

煤化工生产过程复杂,操作风险大,需要根据其特点选择合适的安全风险评价方法。HAZOP 和 LOPA 是目前国际上普遍采用的评价方法,具有系统性和针对性。其中,HAZOP 通过对工艺参数偏差进行结构化分析,挖掘出设计缺陷和运行隐患,与煤化工危险化学品的种类多、工况条件复杂,现已在低温甲醇洗等过程的节点划分、危险辨识和风险控制方面取得了较大进展。LOPA 是一种定量的方法,它通过对已有的安全防护措施的效果进行评价,并对其定量评价,从而为制定相关的安全政策提供科学的依据。结合煤化工高温高压、介质危害等特定工作条件,将两者结合,实现对不同危险点的全方位覆盖,大大提高风险评价的准确性和可靠性。在方法的适用性方面,HAZOP 可以通过小组合作,对潜在的风险进行深入的挖掘,但是对于基础数据的完整性和从业者的业务素质有很高的要求;LOPA 技术虽然可以进行危险等级的判断,但在复杂的生产环境下,容易导致结果的保守性。

(二) 评估流程

研究中所使用的 HAZOP 和 LOPA 的协同评价方法,按照数据采集、节点划分、偏差分析和结果评价四个关键环节进行。数据采集是风险评价的基础,需要对煤化学设备的设计文档、操作规程、设备参数等进行综合整理,对设备在高温高压条件下的强度、密封性等重要参数进行系统的梳理,保证基础数据的完整和可靠,为后续的风险分析提供支持。本研究以简化复杂流程为目标,根据材料流动方向和功能,将整个过程分解成多个独立的分析单元,精确确定各个环节的过程特性和隐患,例如,对低温甲醇洗过程进行分区,进行风险针对性分析。在偏差分析方面,借助 HAZOP 分析系统,并与过程参数的正态范围相结合,并辅以“无”、“多”、“少”等提示语,对由设备故障、操作失误、外界干扰等引起的过程偏差进行系统性的排查,对各种可能的风险进行深入的挖掘^{[8][9]}。在结果评价中,将 LOPA 法融入到事故发生的概率、影响范围和危害程度中,对已有的安全防护层的保护效果进行评价,准确地判断危险水平,并提出相应的防控对策。

(三) 风险等级判定

在安全风险评价中,风险水平分级是一个关键步骤,其目标是确定危险点的优劣,从而为技术改造方案的优选提供决策依据。本文参照国内外有关风险矩阵,把风险水平分为四个等级,即低风险、中风险、高风险和极高风险。其划分标准为:低风险是指事故发生的概率很低,后果很小,可以用正常的管理手段来进行控制。中风险是指有可能发生的事件,其后果比较严重,需要有针对性的预防措施;高风险意味着发生事故的可能性很大,后果很严重,需要马上进行纠正;高风险是指事故的可能性很大,而且是非常严重的,必须停止生产,直到危险降低到可以接受的程度。

在确定危险水平时,要将事故发生的可能性和后果的严重性结合起来。另外,在净化分离过程中,如果由于设备的腐蚀或者操作不当而发生了泄露,会对周围的环境和人身安全产生很大的

影响，因此也需要作为高风险点来进行控制。

四、技改优化策略

（一）工艺改进

本研究以提高煤化工装置的安全生产为目标，从工艺过程的优化和调控策略的完善两个角度，实施风险防控的优化措施。煤化工反应流程复杂，危险介质种类繁多，通过对反应步骤的调控和物料配比的优化，可以有效地减少操作风险，提高安全和效率。通过合理的流程设计，可以有效缓解苛刻工况下的设备载荷和密封压力，降低其安全风险。在控制方案层次上，通过采用集散式 DCS 和 ESD 应急停机系统，对过程风险进行精确的控制。DCS 可实现温度、压力和流量等重要指标的实时监控和动态调整，保证运行参数在安全范围内；独立的静电保护装置，能在工作条件出现异常时，迅速关闭危险流，防止事故扩散^[10]。

（二）设备升级

酸性气体如硫化氢、二氧化碳等，容易引起设备损伤和材料泄露，严重影响企业的安全生产。针对这一问题，本研究拟针对不同的工作环境，选择合适的耐蚀材料，如：双相不锈钢和哈氏合金，在低温甲醇清洗等强腐蚀环境下，能够有效抵抗不同介质的复合腐蚀；对运行中的设备，可以采用内衬橡胶或陶瓷等防腐蚀材料，提高设备的耐腐蚀性。选择合适的防腐蚀材料，不但可以减少设备失效的几率和运营费用，而且可以大大提高设备的安全和可靠性。而对其进行冗余化设计，则是保证生产持续稳定运行的重要途径。若核心装置如压缩机、输送泵和换热器发生失效，则会导致整个系统的关闭，严重时会造成严重的安全事故。通过“一用一备”和“二用一备”两种备用结构，实现了在主装

置发生故障的情况下，迅速实现后备装置的切换，避免了生产中断和安全隐患。

（三）自动化控制优化

煤化学设备智能化改造是提高煤炭化工生产安全防控水平的一项重要措施，其核心内容包括智能监控系统的引入和自动控制策略的优化。本研究以传感器和物联网为基础，建立一套完整的信息采集网络，实现对设备温度、压力、振动和工艺介质成分等重要参数的实时获取，并将其进行无线传输，并将其汇总到中央控制平台进行分析和处理。在煤制醇生产过程中，采用在线气体分析仪和智能传感设备对生产过程进行实时监测，对生产过程中出现的异常情况进行及时的判断，并进行紧急处理。与此同时，本研究还将利用大数据和人工智能算法，对运营历史数据进行深入分析，对潜在风险进行准确预测，提出优化方案，从而提高风险预警的准确性，降低人为因素造成的安全风险。由于传统的控制方法不能适应复杂的煤化工工况，以及突发工况下的响应延迟，因此对自动控制策略进行优化和升级显得尤为重要。

五、结束语

本研究以系统的过程安全风险评价为基础，对煤气化、合成、净化与分离等关键过程中存在的安全隐患进行了综合梳理，确定了关键危险源，高温高压设备失效、危险材料特性、催化剂失效、参数调控失衡、有毒物质处置不当和设备腐蚀等。将 HAZOP 和 LOPA 相结合，实现危险链的危险等级划分，确定高风险链的控制要点，并有针对性地提出流程、设备和自动化三个层次的技术改造优化策略，减少事故发生的几率，提高设备的稳定运行。

参考文献

- [1] 韩晶；王玮佳；刘刚；高硕. 煤化工企业综合风险分析评估 [J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(1): 60-63.
- [2] 康秦宝. 基于风险评估的煤化工聚烯烃生产安全管理对策研究 [J]. 化工管理, 2024, (22): 100-102.
- [3] 赵国良. 探究化工工艺的风险识别和安全评价 [J]. 山西化工, 2022, 42(3): 228-229.
- [4] 刘明；侯明君；周妍. 大型煤气化工艺装置与设备动态风险评估研究进展 [J]. 石油石化绿色低碳, 2023, 8(2): 49-54.
- [5] 陈良超；宋策；方舟；陈学儒；潘伟. 典型煤化工装置设备风险评级与管理系统 [J]. 炼油与化工, 2024, 35(1): 63-66.
- [6] 孙超；王旭；王丹丹. 煤化工行业风险管理对策研究 [J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 282-284.
- [7] 罗慧丰；陈菊香. 基于 AHP-模糊综合评价法煤化工储运装置安全风险评估研究 [J]. 化工管理, 2022, (7): 129-133.
- [8] 王向阳；王金歌；孙妍. 壳牌煤气化风险分析及安全预防措施探究 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(3): 118-120.
- [9] 李祺；高小强. 安全风险预控管理体系在煤化工领域的具体实践 [J]. 石油石化物资采购, 2023, (6): 118-120.
- [10] 宋庆梅. 煤化工企业风险预控管理 [J]. 化工管理, 2021, (33): 124-125.