

化工工艺安全风险辨识与控制关键技术研究

刘建华

华瀛石油化工有限公司 广东惠州 512200

摘要：随着化工行业的快速发展，工艺安全风险辨识与控制成为保障生产安全的重要环节。本文旨在探讨化工工艺安全风险辨识与控制的关键技术，分析当前存在的问题，并提出相应的解决策略。通过文献综述和案例分析，本文总结了化工工艺安全风险的主要类型，包括化学反应风险、设备故障风险、操作失误风险等，并针对这些风险提出了有效的辨识方法和控制措施。研究表明，采用系统化的风险辨识方法和动态的风险控制策略，可以显著提高化工工艺的安全性，减少事故发生概率。

关键词：化工工艺；安全风险；风险辨识

引言

化工行业作为国民经济的重要组成部分，其安全稳定运行直接关系到社会的稳定和人民的生命财产安全。然而，化工生产过程复杂，涉及众多危险化学品和高风险工艺，一旦发生事故，后果往往十分严重。因此，对化工工艺的安全风险进行有效辨识与控制，是当前化工行业面临的重要课题。

一、化工工艺安全风险辨识关键技术

（一）风险辨识的基本概念

在化工工艺安全领域，风险通常被定义为特定危害事件发生的可能性和其后果严重程度的组合。这一定义涵盖了风险发生的概率以及一旦发生可能带来的影响。根据其来源和性质，风险可以被分类为：固有风险，指工艺本身或所使用物质本身固有的危险性；控制风险，指现有安全措施未能完全消除或控制的风险；以及操作风险，指由于人员操作失误或设备维护不当等引发的风险。风险辨识的原则是全面性、系统性、科学性和实用性。全面性要求覆盖工艺的各个环节和所有可能的风险源；系统性则强调从整体出发，分析各要素间的关联；科学性意味着采用合理的方法和依据；实用性则要求辨识结果能够指导实际的安全管理。风险辨识的方法主要包括：危险与可操作性分析（HAZOP），通过引导词系统地发现工艺偏离；安全检查表法，依据标准或经验列出检查项进行排查；故障类型和影响分析（FMEA），分析设备故障模式及其影响；以及初步危险分析（PHA），在项目早期进行快速识别^[1]。

（二）关键风险辨识技术

基于工艺流程的分析技术，如HAZOP，通过系统地选取工艺参数（如温度、压力、流量、液位）和引导词（如空缺、多余、反向、部分），组合产生工艺可能出现的偏差，进而分析导致偏差的原因、后果以及现有的保护措施是否充分。这种方法能够深入挖掘工艺设计、操作条件变化中潜藏的风险。基于危险物质特性的评估技术，则着重于分析工艺中涉及的每种化学物质的物理化学性质（如易燃性、反应活性、毒性）、健康危害和环境危害。这包括评估物质的燃爆极限、自燃点、反应热、相容性等，以确定物质本身固有的危险性等级，并识别在特定工艺条件下可能发生的化学反应失控、泄漏扩散等风险。基于历史数据的挖掘技术，利用数据库中存储的过往事故案例、未遂事件、操作异常记录以及定期的设备检测数据，通过统计分析、模式识别或简单的关联规则挖掘，寻找导致事故发生的共性因素、高风险操作时段或设备故障征兆，从而预测未来可能发生的风险类型和概率。

（三）技术特点与应用范围

基于工艺流程的分析技术，如HAZOP，其优势在于能够系统、全面地覆盖工艺的各个环节，尤其擅长发现设计缺陷和操作条件变化带来的风险，结果相对客观。其局限性在于分析过程耗时较长，需要工艺专家的深度参与，对于非常规或全新的工艺可能存在经验不足的问题。这种方法广泛应用于连续化、流程化的化工工艺，如石油炼制、基本有机化工等。基于危险物质特性的评估技术，优势在于直接针对物质的固有危险性进行评估，结果明确，为选择安全设备、制定应急预案提供基础。

其局限性在于它主要关注物质本身，对工艺条件、设备状态、人为因素等考虑相对较少，有时难以完全反映实际操作中的风险。该技术适用于所有涉及危险化学品的生产、储存、运输和使用环节，是风险评估的基础步骤。基于历史数据的挖掘技术，优势在于能够从实际发生的或接近发生的风险事件中学习，具有现实依据，可能发现传统方法难以察觉的隐藏模式和早期预警信号。其局限性在于历史数据的完整性和准确性直接影响分析结果，对于缺乏历史数据的新工艺或新装置不适用，且挖掘结果可能需要专家解释才能转化为具体的风险辨识结论。这种技术适用于拥有较长时间运行历史和数据积累的化工装置，特别是在事故分析和风险趋势预测方面有应用价值。不同的化工工艺，如高温高压的合成氨工艺、易燃易爆的乙烯裂解工艺、涉及剧毒物质的农药生产等，需要根据其具体特点，选择或组合使用上述技术，以实现有效的风险辨识^[2]。

二、化工工艺安全风险控制关键技术

（一）风险控制的基本策略

在化工工艺安全管理中，风险控制的基本策略包括风险规避、风险减轻、风险转移和风险接受。风险规避是指通过停止使用高风险的原材料、改变工艺路线或放弃整个项目等方式，从根本上消除风险源。风险减轻则是在风险无法完全规避时，采取工程技术措施或管理手段，降低风险事件发生的可能性或减轻其后果的严重程度。风险转移通常涉及购买保险，将部分财产损失风险转移给保险公司，或者在供应链中通过合同条款将部分责任转移给上下游企业。风险接受则是在风险已被识别、评估，并采取了所有合理可行的控制措施后，对于残余风险，如果其水平在可接受的范围内，则允许其存在，但需进行持续监控。风险控制应遵循预防为主、综合治理的原则，步骤上通常包括：识别风险、评估风险等级、确定可接受风险标准、制定并实施控制措施、以及持续监控和评审控制效果。

（二）关键风险控制技术

自动化控制技术是化工工艺风险控制的核心手段之一，它通过安装各种传感器监测工艺参数，利用控制器（如PLC、DCS）根据预设逻辑自动调节阀门、泵等执行机构，实现对温度、压力、流量、液位等关键参数的精确控制和稳定操作，从而避免工艺参数超出安全范围，减少人为操作失误带来的风险。本质安全设计是在工艺和设备的设计阶段就考虑安全因素，通过选择更安全的物料、降低操作温度和压力、采用更安全的工艺路线、

限制危险物料的量等方式，从根本上减少或消除危险源，即使发生故障，后果也相对轻微。实时监测与报警系统则通过遍布装置区的传感器网络，持续监测可燃气体浓度、有毒气体泄漏、关键设备运行状态等，一旦检测到异常或达到预设报警阈值，系统会立即发出声光报警信号，并可能联动启动应急措施，为操作人员提供早期预警，争取宝贵的响应时间，防止小问题演变成大事故^[3]。

（三）技术实施与效果

自动化控制技术的实施需要具备可靠的电源供应、稳定的网络通信环境，以及专业的自动化工程师进行系统配置、编程和调试。对操作和维护人员也有一定的技能要求。本质安全设计的实施要求在项目立项和设计阶段就投入足够资源，进行充分的风险评估和安全论证，选择合适的工艺技术和设备材质，并可能涉及对供应商的选择和设计标准的严格执行。实时监测与报警系统的实施需要根据监测对象选择合适的传感器类型和安装位置，确保数据传输的及时性和准确性，并需要制定清晰的报警处置流程。技术应用后的安全效果评估通常通过对比实施前后的事故发生率、未遂事故数量、工艺异常波动频率、以及应急响应时间等指标来进行。同时，也会评估系统运行稳定性、维护成本、以及对操作人员工作负荷和安全感的影响。有效的技术实施能够显著降低化工事故风险，提高装置的稳定运行时间，保障人员生命安全和环境安全，其效果评估为持续改进安全管理体系提供了依据^[4]。

三、风险辨识与控制的集成与应用

（一）集成策略

风险辨识与控制技术的集成策略，核心在于将两者视为一个连续且互补的过程，而非孤立环节。这意味着在风险辨识阶段识别出的具体危害和潜在事故场景，应直接、明确地指引后续控制措施的选择与设计。例如，通过工艺危害分析（PHA）识别出的某反应器超温风险，应直接关联到设置更高精度的温度传感器、优化冷却系统控制逻辑、或增加紧急停车联锁等控制技术。这种整合旨在打破信息壁垒，确保辨识结果能够高效转化为实际的控制行动。其最终目标是形成一个覆盖风险识别、评估、控制、监控和持续改进的闭环综合安全管理体系。在这个体系中，风险辨识为控制提供了依据和方向，而控制措施的有效性又反过来成为下一次风险辨识和评估的重要输入，形成动态优化的安全循环。这种集成策略的价值在于，它将安全管理的各个要素紧密联系起来，使得安全投入更加精准，安全措施更加有的放矢，从而

提升了整体安全管理的效率和效果。

(二) 应用实例

在不同化工工艺中,这种集成应用具有普遍性。例如,在大型乙烯裂解装置中,基于危险与可操作性分析(HAZOP)等辨识技术识别出的裂解炉烧焦不完全导致结焦堵塞风险,会直接促使设计并实施更高效的在线烧焦控制系统和更灵敏的炉管壁温监测报警系统。在合成氨生产中,通过检查表和故障模式与影响分析(FMEA)辨识出的氨储罐安全阀潜在失效风险,会直接引导采用更高可靠性的安全阀类型、增加在线泄漏监测仪,并制定更严格的定期校验和测试计划。在精细化工的小批量、多品种生产线上,基于场景分析的辨识可能发现特定中间体不稳定的风险,这会直接要求在工艺设计中融入更温和的反应条件、增加中间体快速检测环节,并配置相应的防爆通风和自动泄压装置。这些集成应用的效果与反馈通常体现在装置运行更加平稳、工艺参数波动减少、非计划停车次数降低、以及重大事故隐患得到提前处置等方面。操作人员和管理者普遍反馈,这种集成方法使得安全管理工作更加系统化、目标更明确,减少了安全措施与实际操作之间的脱节。其价值体现在显著降低了操作风险,提高了生产连续性和设备可靠性,保障了人员安全,并可能通过减少事故和停机带来经济效益^[5]。

(三) 挑战与对策

在推进风险辨识与控制技术的集成过程中,会遇到一些实际问题。首先是信息传递和沟通的障碍,辨识团队与控制实施团队之间可能存在专业术语和理解上的差异,导致信息传递失真或延迟。例如,安全工程师描述的风险场景,可能需要控制工程师转化为具体的传感器阈值和逻辑条件,这个转化过程如果缺乏共同语言,就容易产生偏差。其次是资源分配的冲突,辨识工作需要投入大量时间和专家资源,而控制措施的实施又需要工程预算和施工窗口,两者在时间和资源上可能存在竞争。特别是在预算紧张或项目周期紧张的情况下,辨识工作的深度和广度可能会被压缩,或者控制措施的实施会被推迟。此外,现有管理体系可能存在惯性,难以快速适应新的集成流程和方法。许多企业已经形成了固化的安全管理习惯和流程,改变需要时间和决心。还有技术层面的挑战,例如某些先进的控制技术可能成本高昂,或者与现有老旧设备兼容性不佳,导致难以直接应用。针对这些问题,解决的对策与建议包括:建立跨职能的协作团队,将辨识人员、控制工程师、操作人员、

设备维护人员等纳入同一团队,促进常态化沟通与知识共享,使用共同的工作语言和标准化的报告模板,确保信息准确、及时地传递。项目规划阶段应整合风险管理和预算进度,确保资源合理分配。高层管理者需支持并推动试点项目,以促进跨部门合作和安全文化的建立。技术兼容性问题应通过前期论证和测试解决,评估技术的可行性和成本效益,并适时升级老旧系统或寻找更经济的方案。通过安全绩效评估、访谈和事故分析等手段,持续优化集成应用策略。这些措施为集成策略的实施提供了操作路径和保障,有助于克服障碍,实现风险管理和控制的协同增效。

结语

化工工艺安全风险的有效辨识与控制对于化工行业的稳定发展至关重要。通过对关键风险辨识技术和控制技术的研究与应用,以及两者的集成实践,化工企业能够更精准地识别风险、科学地制定控制策略,并及时有效地应对潜在事故。然而,在实际工作中仍面临着信息沟通、资源分配、管理体系适应性和技术兼容性等诸多挑战。化工企业需要持续加强团队协作、优化资源配置、推动管理创新以及开展技术升级,以提升风险辨识与控制的集成水平。未来,随着化工行业的不断发展和技术的持续进步,应进一步探索更加高效、智能的风险辨识与控制方法,不断完善化工工艺安全管理体系,为化工行业的安全稳定运行提供坚实保障,实现化工生产与社会发展的和谐共进。

参考文献

- [1]刘洋.探究化工工艺安全设计中的危险识别与控制策略[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021(4):2.
- [2]巫丽君.化工工艺设计中安全危险的识别与控制研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(19):2.DOI:10.3969/j.issn.1673-4076.2021.19.003.
- [3]钱翠.化工工艺设计中的风险防范对策研究[J].商品与质量,2019,000(001):275.DOI:10.3969/j.issn.1006-656X.2019.01.266.
- [4]管华博.化工工艺安全设计中危险识别和控制策略研究[J].中国化工贸易,2020,012(029):28,30.
- [5]付维.化工工艺安全风险辨识研究[J].化纤与纺织技术,2022.