

精细化工企业硝化工艺安全风险评估与防控措施研究

来华楚

(百合花集团股份有限公司 浙江杭州 310000)

摘要: 化工行业向来被视为“高危行业”，其中硝化工艺更是存在着诸多安全隐患。硝化反应涉及易燃易爆的原料和产品，一旦发生事故后果不堪设想。化工企业必须高度重视硝化工艺的安全风险，从根本上消除事故隐患。通过系统的风险评估、全面的防控措施以及持续的安全管理，才能确保生产安全，维护企业和员工的切身利益。只有把安全生产放在首位，化工行业才能持续健康发展。因此，本文对化工企业的硝化工艺进行全面的的安全风险评估，并提出有效的防控措施，从而进一步确保生产的安全。

关键词: 精细化工；硝化工艺；风险评估

前言

我们必须深入认识硝化工艺的固有风险因素。高温、高压、易燃易爆物质的存在，都是潜在事故的诱因。加之工艺流程复杂，工艺参数控制难度大，更增加了安全管理的挑战。一旦发生偏差，很可能引发火灾、爆炸乃至人员伤亡等严重后果。因此，全面梳理并量化这些风险因素，是制定有效防控措施的前提。基于风险评估结果，企业要采取针对性地安全防控措施。这包括优化工艺路线和设备参数，完善安全设施如防爆设计、在线监测等，健全应急预案和员工培训机制。只有打造一个层层递进的安全防护体系，才能最大限度降低事故发生概率，提高应急响应能力。企业要建立健全的安全管理体系，持续监测关键工艺参数，及时发现并消除隐患。同时，加强员工的安全意识培养和操作技能训练，确保每个人都能严格遵守安全规程。只有这样，硝化工艺的安全管控才能真正落到实处。

1. 背景技术与发展现状

精细化工行业作为国民经济的重要支柱之一，其生产过程中涉及大量的化学反应，尤其是一些高活性、高危险性的硝化反应工艺，更是安全隐患重重。近年来，随着社会对安全生产的日益重视，精细化工企业亟须建立完善的硝化工艺安全评估及防控体系，确保生产过程的安全可控。

从技术背景来看，硝化反应是精细化工领域广泛应用的一类重要化学过程，通过将有机化合物与硝酸等强氧化剂发生亲电取代反应，可合成出各类重要的硝基化合物。然而，硝化反应往往伴有显著的放热效应，极易引发爆炸、火灾等严重安全事故。再者，硝化产物本身通常也具有较高的反应活性和爆炸性，在储运、使用过程中也面临诸多安全隐患。因此，如何有效控制硝化工艺的安全风险，一直是精细化工企业亟待解决的关键问题。

在此背景下，近年来相关研究工作不断深入。首先是安全风险评估方法的不断优化创新。传统的 HAZOP、FMEA 等定性分析手段逐步被量化的动态风险评估方法所取代，工程师可借助先进的模拟仿真手段，全面评估反应过程中的温度、压力变化，并预测可能导致的严重后果。与此同时，基于机器学习的智能化风险预警技术也开始涌现，能够实时监测工艺参数，自动识别异常状态，大幅提升了安全管控的智能化水平。针对硝化反应易失控的特点，研究人员不断探索新型反应器设计，采用精密温控、智能搅拌等手段，最大限度降低反应失控风险。同时，先进的在线检测技术也被广泛应用，可实时监测关键中间产物浓度、pH 值等关键参数，确保工艺稳定可控。除了常规的泄压装置、紧急切断阀等设备防护，一些新型消防灭火技术如泡沫灭火、惰性气体喷淋等也开始广泛应用。同时，针对硝化产品的储存和运输，相关部门也出台了一系列严格的

法规标准，有效遏制了安全事故的发生。

2. 硝化工艺安全风险识别与动态评估

硝化反应是一个剧烈放热的化学过程，反应放热量通常在 200–500kJ/mol，若无法及时有效地进行温度控制，反应温度急剧升高将会导致严重的热失控。此外，硝化过程中会产生大量气体，如氮氧化物、二氧化碳等，如果反应器内压力过高，可能会导致爆炸或容器破裂。另一方面，硝化反应的中间产物，如亚硝酸盐、硝酸盐等，也具有一定的化学活性和爆炸性，需要重点关注其生成及存在的安全隐患。

为了全面把握硝化工艺的动态风险状况，我们需要建立基于物理模型和机器学习的综合评估方法。可以利用反应动力学模型、热力学模型等，构建硝化过程的数学模拟，预测反应温度、压力等关键参数的变化趋势。同时，借助历史工艺数据，应用机器学习算法，如人工神经网络、支持向量机等，建立数据驱动型的动态风险预测模型，能够实时检测工艺异常状态，预测工艺失控的发生概率。通过安装温度、压力、流量等实时监测装置，我们可以随时掌握反应器的运行状况，一旦发现异常，可以及时预警并采取补救措施。同时，利用先进的故障诊断算法，我们可以快速定位导致工艺失控的根源，为事故预防提供依据。

3. 安全型硝化反应器设计

3.1 新型反应器几何结构、温控系统、搅拌机构

硝化反应是一个典型的剧烈放热反应，一旦发生温度失控，就会导致严重的热失控和压力升高，甚至引发爆炸事故。因此，从反应器的固有安全性入手，对其几何结构、温控系统、搅拌机构等进行深入研究和优化设计，是提高本质安全性的关键。可以采用高表面积的管束式结构，利用反应器壁面进行有效冷却，大幅提高热量的传递速率，从而更好地控制反应温度。同时，优化反应区域的流场分布，改善物料的混合均匀性，也有助于降低局部过热的风险。其次，温控系统的设计也至关重要。除了传统的外部冷却管路，还可以考虑在反应器内部集成微型冷却通道，进一步缩短热量传递路径，提高温度调控的灵敏性和精度。此外，还可以采用先进的温度监测和反馈控制技术，实时跟踪反应温度变化，快速响应并纠正偏差，确保温度始终处于安全范围内。通过采用多级或可变转速的搅拌装置，可以改善反应物料的流动状态，增强温度和压力的均匀分布，避免局部过热或压力集中的发生。同时，还可以在搅拌机构上集成温度、压力等传感器，为实时监测反应器状态提供可靠依据。

3.2 采用分级反应、连续化生产

即使采用了先进的反应器设计，一旦发生事故，大量的反应物料存量也会加剧事故的后果。因此，从工艺路线的角度出发，采取

分级反应、连续化生产等措施,降低单次反应的物料投料量,成为提高本质安全性的另一个重要手段。分级反应是指将整个硝化反应过程划分为多个阶段进行,每个阶段仅投加部分反应物料。这样不仅可以改善反应的温压控制,还能大幅降低单次反应的物料存量。一旦发生局部失控,也能有效限制事故范围,减少损失。与之配合的是连续化生产工艺。通过采用管式反应器、塔式反应器等连续化装置,可以实现物料连续投料和产品的连续输出,大幅降低了反应物料的暂存量。这不仅有助于提高生产效率,也为防范大规模泄漏事故提供了有力保障。

3.3 开发基于 CFD 的反应器建模仿真方法

除了针对反应器的实际构造和工艺路线进行优化设计,我们还可以利用先进的建模仿真技术,对硝化反应器的内部流场、温压分布等关键参数进行深入分析,为装置设计提供可靠依据。计算流体动力学(CFD)作为一种高效的数值模拟手段,可以帮助我们全面掌握反应器内部的复杂流场特性。通过 CFD 仿真,我们不仅能分析反应物料在反应器内的流动状态,还可以预测温度和压力的分布情况,为提高反应器的固有安全性提供重要依据。比如,可以依据 CFD 分析结果,对反应器的几何尺寸、进料方式、搅拌机构等进行进一步优化,使其能够更好地满足安全性要求。

4. 硝化工艺过程安全控制技术

4.1 基于先进过程控制理论的多变量协调控制策略

传统的单回路 PID 控制已无法满足日益严苛的安全性要求,因此亟须建立基于先进过程控制理论的多变量协调控制策略。可以利用对反应器内部状态的动态建模,预测未来时段内工艺参数的变化趋势,提前做出适当的调整,确保各项关键指标始终维持在安全范围内。MPC 不仅能充分考虑多个受控变量之间的耦合关系,还能根据实际过程响应情况实时更新模型参数,大幅提高控制精度。最上层为总体优化控制,根据生产目标、安全约束等因素,确定各关键变量的最佳设定点;中间层为多变量协调控制,确保各子系统稳定运行并协调配合;底层为单回路 PID 控制,负责执行设备的实际调节动作。层层递进,上下协同,共同维护工艺的安全稳定运行。最后,可以借助先进的故障诊断和容错控制技术,进一步增强系统的鲁棒性。一旦检测到某项关键参数异常,控制系统能迅速诊断故障原因,采取相应的应急措施,如调整其他变量进行补偿,或者直接切换至备用设备,最大限度地降低事故风险。

4.2 基于机器学习的智能化预警系统

随着工业 4.0 时代的到来,人工智能技术在过程工业领域得到了广泛应用,为硝化工艺的安全控制注入了新的动力。其中,基于机器学习的智能化预警系统尤为引人注目。该系统的核心是利用历史工艺数据,训练出能准确识别异常状态的智能模型。通过持续监测各关键参数的实时变化,系统能快速检测出偏离正常运行范围的异常情况,并结合先前积累的经验,作出准确的故障诊断和原因分析。同时,系统还可以进一步集成优化算法,根据当前状态变量,自动给出最佳的纠正措施,如调整反应温度、改变投料速率等。这不仅能帮助操作人员快速处置异常情况,降低事故风险,还可以促进工艺的持续优化,不断提高安全水平。此外,该系统还具备自学习能力,能够不断吸收新的工艺数据,动态更新内部模型,使其对未来可能出现的新型故障也能做出快速反应。随着时间的推移,系统的预警和诊断能力也将不断增强,为 hardening 工艺的安全性贡献力量。

4.3 关键中间体在线监测与实时量化分析

硝化工艺的安全控制除了着眼于反应器的设计优化和先进的过程控制策略,对关键中间体的实时监测和精准分析也极为重要。

硝化反应涉及多个复杂的中间反应步骤,如亚硝基化、硝基化等,各阶段的转化率和选择性都会对最终产品的安全性产生重大影响。因此,建立可靠的在线监测技术,对这些关键中间体进行实时定量分析,对于确保工艺稳定运行、避免副产物积累具有关键意义。例如,可以采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS),实现对反应液中微量中间体的快速定性定量分析。通过持续监测各中间体的浓度变化趋势,一旦发现异常情况,如某一中间体的积累超标,就能及时预警,采取必要的调控措施,避免事故的发生。同时,上述分析技术还可以与先进的过程分析技术(PAT)相结合,实现对整个工艺流程的全方位监控。利用在线光谱仪、流动分析仪等检测装置,对反应物料的组成、浓度等参数进行实时测量,并将数据反馈至控制系统,确保各个工艺环节都处于最佳状态。

5. 综合安全管理体系构建

5.1 建立健全的安全生产责任体系

企业必须建立健全的安全生产责任体系,明确各方主体在安全管控中的具体职责。在组织层面,要成立由企业最高领导直接负责的安全生产委员会,统筹协调各部门的安全管理工作,制定完善的安全生产管理制度和操作规程。同时,各生产车间、试验室等单位也要设置专职安全管理人员,切实负责本单位的日常安全检查、隐患排查等具体工作。在操作层面,要建立全员参与的安全责任制度,将各岗位安全管控任务明确到人,做到岗位责任、过程监控、效果考核相结合。同时,要设置有效的奖惩机制,把安全绩效考核作为员工晋升、奖惩的重要依据,充分调动全员的主动性和积极性。只有健全完备的安全生产责任体系,才能确保安全管控措施落地生根,真正形成"人人有责、人人参与"的安全生产氛围。

5.2 构建基于大数据分析的智能化安全预警平台

企业要充分利用大数据分析、人工智能等技术,构建智能化的安全预警平台,实现对安全风险的精准识别和预警。平台需要汇集来自各类传感设备、DCS 系统等的大量工艺参数、设备状态、人员活动等原始数据,建立全面的安全信息数据库。然后,通过机器学习、深度学习等算法,分析历史数据中蕴含的异常模式和规律,建立对各类安全风险的智能识别模型。一旦实时监测到异常情况,平台就能及时预警,为安全管理人员提供决策支持。平台还可进一步集成优化算法,根据预警信息自动给出相应的应急措施建议,提升管理的智能化水平。此外,平台还可以实现远程监控、数据可视化等功能,帮助管理者全面掌握安全生产态势,为科学决策提供有力支撑。

结语

精细化工行业是国民经济发展的重要支撑,其中硝化工艺在诸多领域扮演着关键角色。但由于工艺流程复杂,原料易燃易爆,安全隐患始终存在。一旦发生安全事故,后果不堪设想,不仅会造成人员伤亡,还可能引发环境污染和经济损失。因此,精细化工企业务必高度重视硝化工艺的安全风险管控,采取有效措施切实防患于未然。

参考文献

- [1]磺胺甲恶唑降解与污染防治技术进展[J]. 高荣;尹笑宇;侯森;赵雪;任南琪;陈瑛., 2023 (11)
- [2]磺胺甲恶唑对除磷微生物胞内聚合物的影响研究[J]. 辛浩洋;张华;黄健;奚姗姗;罗涛;何春华., 2023 (10)
- [3]不同浓度磺胺甲恶唑对短程硝化和厌氧氨氧化处理效果的影响[J]. 许婧;李卫华., 2023 (04)
- [4]反硝化过程中 N₂O 积累特性及影响因素探究[D]. 魏百惠. 哈尔滨工业大学, 2019