

# 有机化学工艺中的火灾与爆炸危险性分析及安全设计

刘明娣<sup>1</sup> 文靖<sup>2</sup>

1. 长沙国顺安防技术咨询有限公司 湖南 长沙 410000

2. 浏阳天福打叶复烤有限责任公司 湖南 长沙 410000

**摘要:** 有机化学工艺涉及众多易燃易爆原料, 存在显著的火灾与爆炸危险性。本文深入分析了火灾与爆炸的基本原理及有机化学工艺中的具体危险源, 如可燃物质、助燃物质及点火源等。为确保生产安全, 提出了包括工艺路线优化、设备设施安全设计、防火防爆措施实施及完善安全管理制度等在内的综合安全设计策略。旨在通过科学合理的安全设计, 有效降低有机化学工艺中的火灾与爆炸风险。

**关键词:** 有机化学工艺; 火灾与爆炸危险性; 安全设计

引言: 有机化学工艺, 作为化学工业的核心领域之一, 其生产过程中涉及大量易燃易爆物质, 使得火灾与爆炸成为该领域面临的主要安全风险。近年来, 国内外有机化学工厂发生的火灾与爆炸事故, 不仅给人们的生命财产安全带来了严重威胁, 也引发了对有机化学工艺安全性的深刻反思。因此, 深入分析有机化学工艺中的火灾与爆炸危险性, 探索有效的安全设计策略, 对于预防事故发生、保障生产安全及环境保护具有至关重要的意义。

## 1 有机化学工艺概述

### 1.1 有机化学工艺基本概念

(1) 有机化学工艺的定义及特点。有机化学工艺是利用有机化学原理和方法, 将有机物质转化为目标产品或中间体的过程。这一工艺的特点在于原料多样、反应复杂、产品丰富, 且多数反应需在特定条件下进行, 如温度、压力、催化剂的存在等。通过精心的设计和操作, 可以高效、环保地生产出满足市场需求的各种有机化合物。(2) 有机化学工艺的主要应用领域。有机化学工艺广泛应用于医药、农药、染料、日化、材料等多个领域。在医药领域, 它是合成新药的关键; 在农药领域, 它为农业生产提供了重要保障; 在染料行业, 它丰富了色彩世界; 在日化领域, 它促进了化妆品、洗涤剂等产品的创新; 在材料科学中, 它是合成新型高分子材料的重要途径。

### 1.2 有机化学工艺中的典型反应及过程

(1) 加氢、氧化、精制、脱氢等典型反应。在有机化学工艺中, 加氢反应是常见的还原反应, 用于提高产品的饱和度和稳定性。氧化反应则通过引入氧原子改变有机物的化学性质。精制反应用于提高产品的纯度和质量, 去除杂质。脱氢反应则是氧化反应的逆过程, 用于

制备不饱和化合物。(2) 原料、中间产物及产品的性质及危险性。有机化学工艺的原料、中间产物及产品通常具有可燃性、易爆性、有毒性和腐蚀性等特点。因此, 在生产过程中需要严格控制反应条件, 采取必要的安全措施, 如防爆、防火、防毒和防腐等, 以确保生产的安全性和环保性。

## 2 火灾与爆炸危险性分析

### 2.1 火灾与爆炸的基本原理

(1) 燃烧的三要素及燃烧形式。燃烧是一种化学反应, 它必须满足三个基本条件: 可燃物、助燃物(通常是氧气)和点火源。只有当这三个要素同时存在并相互作用时, 燃烧才会发生。可燃物可以是固体、液体或气体, 助燃物则通常是空气中的氧气。点火源可以是明火、高温表面、电火花等。燃烧形式多种多样, 包括闪燃、着火、自燃和爆炸等。(2) 爆炸的分类及化学性爆炸的机理。爆炸是一种剧烈的物理或化学能量释放过程。根据爆炸的性质和原因, 爆炸可以分为物理爆炸和化学爆炸。物理爆炸是由于容器内部压力过高而导致的破裂, 而化学爆炸则是由于物质内部发生剧烈的化学反应, 瞬间产生大量气体和热量, 使体系内压力急剧上升而发生的破裂。化学性爆炸的机理通常涉及链锁反应, 即反应物分子在引发剂的作用下发生链锁反应, 生成大量高能中间产物, 这些中间产物进一步引发更多的分子反应, 导致爆炸性增长<sup>[1]</sup>。

### 2.2 有机化学工艺中的火灾与爆炸危险源

#### 2.2.1 可燃物质及助燃物质的种类、浓度与工艺风险

##### (1) 可燃物质特性

有机化学工艺中常见可燃物质包括烃类(如甲烷、丙烷)、醇类(如乙醇、甲醇)、醚类(如乙醚)、酮类(如丙酮)、酯类(如乙酸乙酯)等。这类物质的

闪点普遍低于50℃（例如乙醚闪点为-45℃，甲醇闪点为11℃），自燃点低（如甲烷自燃点为538℃，乙醇为423℃），极易被点燃。

(2) 爆炸极限数据

以甲烷为例，其在空气中的爆炸极限为5%~15%（体积浓度），当浓度达到此范围时，遇火源即可能爆炸。下表为部分常见可燃物质的爆炸极限：

表1 爆炸极限表

物质类别	典型物质	爆炸下限 (LEL, %)	爆炸上限 (UEL, %)
烃类	甲烷	5.0	15.0
醇类	乙醇	3.3	19.0
醚类	乙醚	1.9	36.0
酮类	丙酮	2.5	13.0



图1 工艺风险示意图

2.2.2 点火源的类型、分布及其对安全的潜在威胁

点火源分类及典型场景：明火：加热炉、焊接火花等（温度可达1000℃以上）；高温表面：反应釜外壁、管道（温度常超过200℃，可能超过某些物质自燃点）；电气火花：电机短路、开关电弧（能量可达数焦耳，足以点燃可燃蒸气）；静电火花：物料输送摩擦（静电电压可高达数万伏，放电能量约0.1~10mJ）；摩擦撞击火花：机械部件磨损、工具跌落（能量约1~10J）。

试验数据对比：不同点火源能量与可燃物质最小点火能（MIE）的匹配关系：

表2 试验数据

点火源类型	典型能量范围	甲烷 MIE (0.28mJ)	乙醇 MIE (0.65mJ)
静电火花	0.1~10mJ	可点燃	可点燃
电气火花	1~1000mJ	可点燃	可点燃
摩擦火花	1~10J	可点燃	可点燃

2.2.3 粉尘爆炸的特性、条件及其灾难性后果

粉尘爆炸三要素：可燃粉尘云：面粉、淀粉、有机颜料等粉尘浓度达到爆炸极限（如玉米淀粉爆炸下限为45g/m³）；点火源：静电、火花、高温（粉尘最小点火能约1~10mJ）；受限空间：粉尘爆炸在封闭或半封闭空间内破坏力更强（压力可达0.5~1MPa）。

灾难性后果案例：2015年某石化企业粉尘爆炸事故中，因聚乙烯粉尘浓度超标（实测80g/m³），遇静电火花引发爆炸，造成设备损毁面积达300m²，爆炸冲击波超压导致周边50m内建筑玻璃全部破碎。

3 安全设计策略与实践

3.1 工艺路线的安全设计

(1) 优选成熟工艺路线。酯化反应可通过酸催化或酶催化进行，其中硫酸催化的酯化反应技术成熟，历史

悠久。尽管其他新型催化剂如离子液体或固体酸也能催化该反应，但在安全设计层面，硫酸催化工艺因其反应条件温和、操作简便、副产物易于处理而被广泛采用。此外，选择此工艺时还需考虑其灵活性，如设置可调节的加热冷却系统，以便在异常情况下快速调整温度，控制反应进程。(2) 规避高度危险物料。在酯化反应中，常用的原料包括醇类和羧酸类化合物，这些物质虽具有一定的易燃性，但相较于使用氯代烃等高度危险溶剂，其安全风险相对较低。若必须使用高危险性溶剂（如二甲苯），则需严格限制其在生产系统中的存量，采用氮气保护，减少空气接触，防止形成爆炸性混合物。同时，应安装高效废气处理装置，如催化燃烧装置，以减少挥发性有机物的排放。

3.2 设备设施的安全设计

(1) 设备选型与材质考量。针对酯化反应中的加热、冷却、搅拌及物料输送需求，应选用具有耐腐蚀、耐高温、耐压特性的设备。例如，反应釜可采用不锈钢材质（如316L），因其良好的耐腐蚀性和机械强度，适合用于处理酸性介质。对于输送腐蚀性液体的管道，推荐使用玻璃衬里或聚丙烯材质，以减少物料对管道的腐蚀，延长使用寿命。(2) 关键设备的安全设计强化。压力容器与反应釜：除了基本的强度设计外，还需考虑安装远程监控系统，实时监测压力、温度及液位，确保操作在安全范围内。反应釜应配备磁力搅拌器，避免使用机械密封产生的摩擦火花；管道系统：采用双阀设置，防止物料泄漏；在关键位置安装爆破片或安全阀，以应对超压情况。同时，管道布局应优化，减少弯头和盲端，以降低流体阻力，减少堵塞风险；安全附件：确保所有安全附件（如压力表、温度计、安全阀）定期校验，且安装位置便于观察和操作。(3) 安全设施配置。

增设紧急停车系统(ESD),一旦检测到异常参数,立即切断关键设备的电源或物料供应。此外,设置可燃气体探测器和火灾报警系统,联动启动自动灭火装置或紧急疏散系统,提升整体应急响应能力<sup>[2]</sup>。

### 3.3 防火防爆措施的设计

(1)火源控制与消除。在酯化车间内,所有电气设备应为防爆型,电线铺设需符合防爆要求。禁止携带易燃易爆物品进入生产区域,作业人员需穿戴防静电工作服。车间内设置明显的“禁止烟火”标识,并安装监控摄像头,实时监测火源风险。(2)防静电积聚与火花放电。酯化反应中,物料输送和搅拌过程中易产生静电,需确保所有管道、储罐和设备正确接地。反应釜搅拌轴和物料输送管道采用导电材料,或安装静电中和器,有效消除静电积累。此外,定期检测接地电阻,确保接地系统有效运行。(3)泄漏检测与应急处理。在关键设备周围设置连续泄漏监测系统,如红外气体检测仪,对挥发性有机物进行实时监测。一旦检测到泄漏,立即触发报警,并启动应急预案。应急预案中应包含紧急切断物料供应、开启局部通风、疏散人员等具体措施,同时明确救援队伍组成及联络机制,确保快速响应。

### 3.4 安全管理制度与应急预案

(1)安全管理制度的制定及执行。安全管理制度是确保生产过程安全的重要基础。在有机化学工艺中,应建立完善的安全管理制度体系,明确各级管理人员的安全职责和操作人员的安全生产行为规范。同时,还应加强对安全管理制度的执行力度和监督考核,确保各项制度得到有效落实。(2)应急预案的编制及演练。应急预案是应对突发事件的重要手段。在有机化学工艺中,应根据生产工艺特点和潜在安全风险编制详细的应急预案,明确应急响应流程、应急处理措施和应急救援队伍等。同时,还应定期组织应急预案演练活动,提高员工的应急反应能力和协同作战能力。(3)事故应急响应流程及措施。事故应急响应流程和措施是确保在突发事件发生时能够迅速有效地进行处置的关键。在有机化学工艺中,应明确各级管理人员的应急响应职责和操作人员的应急处理任务。同时,还应建立完善应急通讯机制和物资保障体系,确保在事故发生时能够及时传递信息并调配应急资源。通过科学合理的安全设计策略与实践的应用,可以显著提高有机化学工艺的安全性能和生产效率,为企业的可持续发展奠定坚实基础<sup>[3]</sup>。

## 4 安全设计的实施与效果评估

### 4.1 安全设计的实施步骤及方法

(1)设计阶段的安全风险评估及控制。在设计一套有机化工生产设施时,首要任务是进行全面的安全风险

评估。例如,考虑某生产线上使用的原料是否含有易燃易爆成分,工艺过程是否存在高温高压环节,设备是否可能因腐蚀而泄漏等。针对评估出的风险,设计团队需制定控制措施。比如,选择低毒、低爆的原料替代高风险物质,优化工艺以减少高温高压操作,为关键设备增加冗余设计以提高其可靠性。(2)施工阶段的安全管理及监督。施工阶段,安全管理至关重要。以设备安装为例,所有设备在安装前需进行严格的质量检查,确保其符合设计要求。施工过程中,应设立专职安全员,负责现场安全监督,确保施工活动遵循既定规程。此外,对施工人员进行定期的安全培训,提高其风险识别和应对能力,如教授正确穿戴个人防护装备,掌握紧急疏散路线等。(3)生产运行阶段的安全监测及预警。生产运行阶段,需建立一套完善的安全监测体系。以某反应釜为例,可安装温度传感器和压力传感器,实时监测其内部状态。一旦温度或压力超出预设范围,系统立即发出预警,提示操作人员采取相应措施,如降低加热速率或开启安全阀释放压力。

### 4.2 安全设计的效果评估方法

(1)事故发生率及严重程度的量化评估。通过历史数据对比,量化评估安全设计实施前后的事故发生率及严重程度。例如,统计实施安全设计前一年与后一年的火灾、爆炸等事故次数,以及每次事故造成的经济损失和人员伤害情况。通过数据对比,直观展现安全设计的效果。(2)安全设施性能的定量与定性评估。对于安全设施,如自动灭火系统、紧急停车系统等,可通过定量与定性相结合的方式评估其性能。定量评估可基于故障率、响应时间等指标,而定性评估则可考虑操作人员的反馈、维护保养的便捷性等。

### 结束语

综上所述,有机化学工艺中的火灾与爆炸危险性不容忽视。通过全面的危险性分析,我们深刻认识到安全设计在预防事故中的重要性。未来,应持续加强有机化学工艺的安全管理,不断优化安全设计策略,提高生产设备的本质安全水平。同时,加强员工培训,提升全员安全意识,共同构建安全可靠的生产环境,确保有机化学工艺在安全的基础上高效发展,为人类社会的进步贡献力量。

### 参考文献

- [1]周国亮.有机化学实验中有效反应条件的调控[J].教育科学,2021,(04):38-39.
- [2]邓启福.有机化学反应中的热管理与反应速率控制[J].建筑技术科学,2024,(06):60-61.
- [3]高斌辉.有机化学反应中的选择性控制与副反应抑制[J].建筑技术科学,2023,(05):55-56.