

微化工技术在炸药制备中的应用实践

漆良卿

江西宜丰国泰化工有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15075

[摘要] 微化工技术凭借在微尺度条件下对流体行为的精细调控能力被广泛视为推进化工过程绿色化的重要路径之一,该技术已成功应用于多种含能材料的合成工艺,还实现了CL-20微球及硝化棉基球形发射药的高质量制备过程。微化工技术在炸药制备中的应用能够提升反应物料在微尺度中的混合均匀度,从而确保操作过程的安全性。基于此,本文对微化工技术在炸药制备中的应用进行探讨。

[关键词] 微化工技术; 炸药制备

中图分类号: TJ55 **文献标识码:** A

Application of Microchemical Technology in Explosive Preparation

Liangqing Qi

Jiangxi Yifeng Guotai Chemical Co., Ltd

[Abstract] Microchemical technology, recognized as a crucial pathway for advancing the greening of chemical processes due to its precise control over fluid behavior at the microscale, has been successfully applied in the synthesis of various energetic materials. It has also enabled the high-quality preparation of CL-20 microspheres and nitrocellulose-based spherical propellants. The application of microchemical technology in explosive preparation enhances the uniformity of reactant mixing at the microscale, thereby ensuring operational safety. Based on this, this paper explores the application of microchemical technology in explosive preparation.

[Key words] Microchemical technology; Explosive preparation

引言

随着我国新版《环境保护法》的正式实施,国家对化工生产安全性的要求不断提高,传统炸药合成路径所面临的本质安全与污染控制问题亟待优化,如何实现炸药合成流程的绿色转型成为当前含能化工过程优化设计中需优先解决的核心问题。微反应技术的应用有效提升了反应传热与物质转移效率,增强系统运行的过程可控性,推动含能材料制备技术向更加模块化的方向持续发展。

1 微化工技术在炸药制备中的应用实践

1.1 单硝化反应

在炸药前驱体的单硝化工艺中,反应物一般为芳香族化合物和混酸,传统间歇式反应方式存在反应热积聚、不均匀混合等风险,易诱发热失控情况,采用微通道反应器后,通过高比表面积及强化的流体影响有效提升硝化剂与底物分子在微尺度内的界面接触程度,使硝基的定向引入更具控制性。单硝化反应在微反应器中以连续流模式运行,一般配置耐腐蚀耐温的陶瓷微结构通道,在控制反应物浓度梯度的同时实现高效换热,从而维持稳定的反应温度分布,抑制副反应发生,系统整合温度与流量传感模块并嵌入反馈控制回路,实时调节进料速率,以保障反应动

力学条件精确可控。操作过程中应精细设定关键参数如混酸流比、通道雷诺数、反应压力,以满足硝基引入的热力学驱动要求,避免因局部反应超温导致材料降解,微化工装置中可选用Y型或T型微混合结构,以剪切卷流效应缩短混合时间,提高反应均匀性。单硝化过程中反应生成热迅速传递至通道壁面并经外壳换热单元导出,有效降低爆炸敏感性,提升反应过程安全水平,与传统釜式硝化相比,微反应器能量利用效率高,危险化学品处置安全,为炸药制备提供安全的工艺流程。

1.2 C—NO₂硝基化合物炸药

1.2.1 1-甲基-4,5-二硝基咪唑

1-甲基-4,5-二硝基咪唑是高能量密度含能材料的代表,其合成反应涉及咪唑环的位点选择性硝化,对C4与C5位点硝基引入的精度控制提出较高要求,传统间歇式反应中存在混合不均问题,易诱导副反应生成,导致目标产物收率下降,后处理步骤复杂。微化工技术实现该反应过程,需精准控制反应物料摩尔配比,确保硝化剂在反应区域内形成稳定浓度梯度,避免局部反应强度过大引起反应物热突变,反应通道内设有高效换热结构实现反应热瞬时转移至冷却模块,保持反应物温度恒定在设定窗口,抑制过硝化及分解反应发生,并借助集成化压力控制组件维

持微反应器内恒定反应压强,防止气泡诱发流体扰动,从而保障反应混合流场稳定。通道构件选用耐强酸腐蚀材料以匹配高浓度混酸环境,避免结构疲劳及界面析出对反应稳定性的影响^[1]。

1.2.2 3,4-二硝基吡啶

3,4-二硝基吡啶的制备工艺需在确保吡啶环结构稳定性的基础上精准控制硝基的引入位点,避免发生过硝化反应风险。传统批式反应过程中因反应热积累与流体混合不充分导致局部高温区域诱发不完全反应,降低目标产物选择性,采用微化工技术可通过微尺度反应器内的均匀流体剪切作用,实现混酸与起始吡啶底物在硝化区内的快速混合,改善反应过程的温度浓度场分布。该反应通常采用连续流操作模式,入口端配置多路精密进料泵以调控反应物摩尔比,通道段设置高导热金属内壁维持反应温度恒定,为强化C3与C4位点的定向硝化,需调节反应时间实现电子密度分布控制,促进硝基优先选择性进攻预期碳位。微反应整合温度、压力在线监控装置,配合反馈闭环控制模式在反应物波动初期自动修正工艺参数以保障反应稳定性,微通道结构设计应充分考虑反应物扩散系数与黏度匹配关系,避免层流分离,提升整体反应效率。

1.3 N—NO₂硝胺炸药

N—NO₂硝胺炸药由含氮前驱物与硝化剂发生硝酸酯化反应形成N—NO₂结构,反应过程高度放热且易伴随副反应生成如氮氧化物释放,对传统间歇工艺构成热失控风险。微反应器中反应物通过多通道供料装置以可控流速进入反应腔体,并在高剪切混合结构中实现均匀分布,确保N位氮原子与硝化试剂充分接触,通道壁面具备高导热性能并配置高精度温控系统,可即时抽取反应热保持温度稳定,避免临界热累积导致反应物自加速,系统内嵌反应物浓度监测装置实时监控热释放趋势,实现闭环反馈调控。N—NO₂硝胺类化合物对反应环境中的酸碱性高度敏感,需精确设定混酸组分比例使生成物在最优条件下稳定析出,微反应平台结构紧凑,操作区域分布合理,反应单元可模块化组合串联多个反应腔体实现产能扩展,且全程封闭运行,降低高能中间体泄漏的概率,后处理单元产物流经固液分离使目标硝胺炸药具备较高纯度,副产物可经管道引流至中和回收单元实现资源循环^[2]。

1.4 C—ONO₂硝酸酯炸药

C—ONO₂硝酸酯炸药由含羟基的有机前驱物在混酸作用下发生酯化反应形成碳—硝酸酯键,其反应热释放速率快且对温度波动敏感,易因热聚积诱发爆炸性分解,因此传统间歇操作方式在安全性与反应稳定性方面难以满足高能材料制造的要求。微反应过程中反应物借助高精度泵送装置设定的摩尔比进入微通道网络,并在结构优化的混合单元中迅速接触形成窄分布的反应界面,反应区域壁面采用高导热材料并配套快速热交换模块,将单位体积反应热高效传导至冷却回路实现反应温度的动态稳定控制。C—ONO₂键的形成速率受反应温度影响,微反应器中设有实时温压监测系统用于识别反应中间态及副反应迹象,结合

闭环控制模式自动调整进料流速,避免不完全酯化与过硝化反应发生。为防止原料分布不均导致的局部反应异常,需充分考虑雷诺数与剪切速率匹配关系,确保流体流态稳定且反应物质迁移效率高,反应液体经由末端冷却段降温后进入分离区,目标产物通过脱酸处理获取高纯度C—ONO₂炸药,同时未反应物及副产物通过在线分流系统回收处理提升资源利用率并降低排放负荷^[3]。

1.5其他炸药相关含能助剂

1.5.1硝酸酯增塑剂

硝酸酯增塑剂具有优异的柔韧性,可有效改善炸药的加工性能,由于该类反应过程伴随剧烈放热,传统釜式反应在温控方面存在局限性,应用微化工技术后反应物在微通道中以连续流动方式运行,通道内表面与热传导单元实现紧密接触,可瞬时导出反应热,抑制局部升温所引起的副反应。可以采用可调节比例泵精确控制原料配比,在微混合区形成稳定层流结构提升物质传递速率,同时通道压力调节装置确保反应物在低波动状态下运行,避免因气泡聚集诱发冲击失控,为提高反应选择性。通道设计中应引入强化分段反应模块将反应分为初级活化、主反应、终止调控三个区域,并配合在线红外吸收检测单元实施中间产物追踪,生成的硝酸酯增塑剂经冷却区降温后直接进入液相分离系统脱除混酸残余,再利用膜过滤技术提纯获得目标分子结构完整且含水率低的高性能硝酸酯类增塑剂。

1.5.2硝酸异辛酯

硝酸异辛酯是单组份液态硝酸酯增塑剂,具有良好的低温柔韧性,其合成主要是异辛醇与混酸在受控条件下进行酯化反应,该过程在传统釜式操作中因反应剧烈放热、操作波动大常伴随温度难控问题。在微通道反应中,反应物借助高精度流体泵以设定比例注入混合模块,在微尺度空间内迅速形成均质反应体系,随后进入主反应段进行定向酯化反应,微反应器通道结构采用高热导率材料构建,配合紧耦合冷却单元实现高热流密度下的实时温度调节,有效抑制局部热积聚及副反应发生,保障反应过程在热力学稳定区间内运行。系统集成在线监测装置,运用紫外吸收光谱技术实时反馈反应物转化率,结合流量与温度控制模块构成闭环调节机制实现反应条件动态最优化,硝酸异辛酯产物在反应后段通过中和处理模块进行脱酸,获得低水分高纯度的成品。该微化工合成过程可以模块化单元串联提升产能,具备快速启停特点,适用于高风险含能化学品的小批量连续制备^[4]。

1.5.3二硝基萘

传统工艺采用间歇式反应釜进行硝化操作,普遍存在反应热积聚、传质速率低等问题,易引发局部过硝化,导致操作安全风险升高。采用微通道反应器进行二硝基萘合成可提升反应过程的安全性,该反应过程一般由萘与混酸在特定温度下反应形成邻位硝基化产物,微系统以热传导高效的通道设计配合精准流量控制模块,实现反应物的稳定输入,并利用高导热壁面结构迅速导出反应热量,避免局部升温过高导致副反应发生,反应通

道可分区布置为反应起始段、主反应段、缓释段,梯度调节酸浓度促进硝基选择性引入目标位点。为提高目标产物收率,利用压力反馈调控装置对反应中间体浓度进行实时修正,保障反应稳定运行,二硝基萘生成液经冷却段降温后进入分离模块,通过相分离、洗涤和固液分离等步骤去除未反应底物,获得纯度稳定且粒径分布可控的目标产物。

2 微化工技术的不足之处及解决办法

2.1 微通道内液体流动与传递

为解决微通道内液体流动与传递过程中存在的压降波动、停留时间分布不均等问题,应优化通道结构参数实现流场稳定,在设计阶段采用渐缩渐扩结构调节局部流速梯度,减少边界层附着效应,提升整体流体通畅性,并运用精密计量泵调控进料压力与流速,匹配液体黏度确保稳定层流状态。对于反应物在壁面产生吸附的问题,可应用表面改性技术改善润湿性能,降低流动阻力并减少滞留,同时引入微振动单元加强界面扰动,提高分相体系在微尺度内的扩散速率,并结合数据反馈系统实时监控流动行为,借助自适应控制模块动态调整操作参数,保持通道内传质与热传导环境的最优状态^[5]。

2.2 微化工设备

为提升微化工设备在炸药制备中的适应性,应优先选用具备优异的耐酸碱性及力学强度的复合材料,对反应接触表面进行微观涂层处理,以降低腐蚀速率,延长设备稳定运行周期,并实施模块化装配理念,将反应单元、换热单元、混合单元、传感单元整合于标准化载体平台实现快速更换,根据工艺参数要求灵活调整反应通道尺度。同时设置自动化数据采集单元,结合反

馈调节模式实时修正流量,确保各功能部件协同运行状态的连续性,从而提升复杂反应过程中的操作精准度。

3 结束语

综上所述,当前,微化工技术在炸药合成中的应用逐渐成为含能化工研究的关键方向,结构简单且流体性质优良的炸药合成反应中利用微通道反应器能够实现多项连续化工艺流程。在开发适配不同炸药反应路径的微通道反应平台时,需针对具有共性与差异性的化学反应体系开展多维度研究,构建具有高度整合能力的工程化微系统架构,并加强反应热管理,推动微反应装置在高风险炸药合成中的安全应用。

[参考文献]

- [1]微化工技术为化工安全“护航”[J].浙江化工,2025,56(03):15.
- [2]赵丽.绿色化工技术在精细化工中的应用[J].化纤与纺织技术,2025,54(03):76-78.
- [3]王姣姣.微化工技术在化学反应中的应用研究[J].化纤与纺织技术,2025,54(02):49-51.
- [4]史喆,邢峰,康红艳,等.HAZOP分析在火炸药工艺风险控制中的应用[J].固体火箭技术,2024,47(06):774-783.
- [5]林禾阳,杨顺顺,张利,等.微化工视角下化学品分布式制造[J].中国科学:化学,2024,54(11):2027-2036.

作者简介:

漆良卿(1979--),男,汉族,江西宜丰人,本科,单位:江西宜丰国泰化工有限责任公司,职称:中级工程师,研究方向:化工(民爆)。