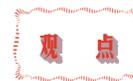


DOI:10.11943/CJEM2024068

文章编号:1006-9941(2024)03-0232-03



## 含能材料通道式制备技术的发展思考

通道式制备技术具有高效的混合和传递性能、反应空间小、模块化结构、并行放大,可有效提高反应过程安全性和过程的精准调控,实现连续安全生产等优点,其应用领域正在从精细化工、医药等逐渐拓展至含能材料领域,可有效解决传统间歇反应模式中所存在的合成过程可控性差、效率低、危险性高、工程放大难等问题。目前,通道式制备技术已实现了多种含能材料的合成、结晶及包覆过程,从而开启了含能材料制备模式的革新时代。因此,可以预见在未来几年内,含能材料通道式制备技术将在基础研究和原始创新方面持续发力,在工程应用方面不断突破,形成通道式制备工艺设计和装置研发能力,实现含能材料的本质安全生产,为推进新时代武器装备的高质量发展提供强大科技支撑。

### 1. 含能材料通道式制备技术的发展现状

#### (1) 含能材料通道式制备技术特点

目前,含能材料制备普遍采用反应瓶/釜为载体的间歇式制备技术,经小试、中试、扩试等阶段实现制备能力的逐级放大。传统制备技术虽然具有适应性强、装置制造技术成熟等优势,但存在在线载药量大、传质传热效率低、工艺参数控制精度差、逐级放大复杂等问题,易造成产品质量波动和反应过程失控,亟需发展新工艺技术和新装备,从本质上解决其过程安全、放大和调控等问题。通道式制备技术兴起于上世纪九十年代初,其连续、安全、高效的特点能够很好解决高污染、高能耗、易燃、易爆等诸多行业所面临的共性技术难题,契合了含能材料安全可持续发展的迫切需求,从而掀起了通道式技术在含能材料制备领域的研究热潮,不断丰富该技术的研究内涵,促进工艺技术创新、核心装置开发与工程化应用。

在研究内涵上,含能材料通道式制备是指通过不同结构和尺寸的通道反应器,以连续流动模式进行多个物料的混合和过程工艺参数的调控,实现单质及复合炸药的连续可控制备。目前,含能材料通道式制备技术内涵主要包括通道式合成、结晶、包覆等内容,涉及化学工程、流体力学、安全评估及在线检测等多个研究方向。此外,通道式制备技术具有较高的集成兼容性,可与新兴绿色化学技术、数字化技术等集成,逐步形成了具多学科交叉特性的研究领域。

在装置能力中,通道反应器是含能材料通道式制备中最为核心的单元。通道式反应器具有体积小、载药量低、停留时间分布窄、温度精确控制等优势,其出色的“三传一反”特性,在反应过程强化和装置系统小型化中发挥了重要作用。相较于间歇式制备技术,通道式制备技术在线载药量降低至釜式的1%~1%,传质传热效率数量级提升,危险系数显著下降,有效提升了含能材料制备过程的安全性。为实现某化学或物理功能,可将不同类型的通道反应器进行组合,形成通道单元模块。将不同功能的通道单元模块进行系统集成,配套温度控制系统和输送系统等辅助单元,形成通道单元撬块(图1)。通道单元撬块具备独立完成含能材料全流程连续化制备的关键核

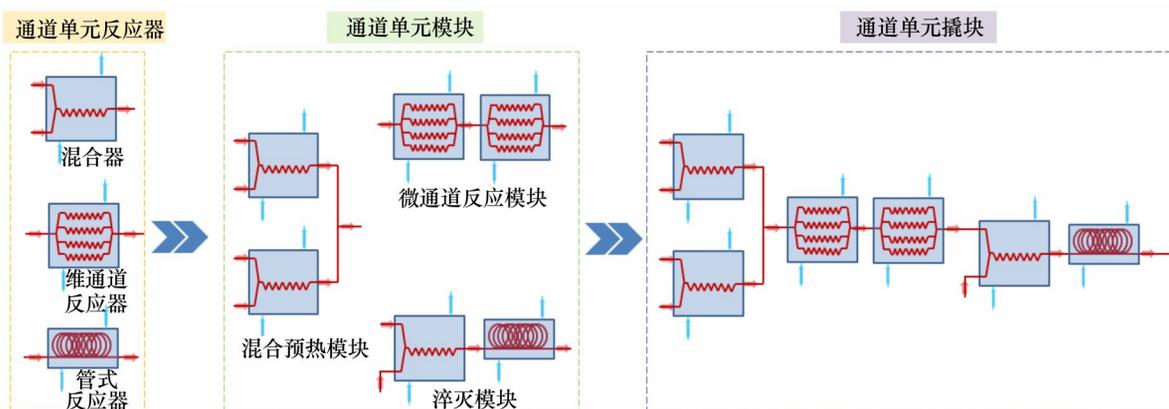


图1 通道单元撬块示意图

心能力,在此基础上进行并联复制,可快速实现含能材料的规模化放大和批量化制备。通道式反应技术以柔性模块化进行集成,可实现含能材料现代化生产线的数字化网络构建和智能化控制,是提升武器装备现代化水平的强有力手段和途径。

## (2) 含能材料通道式制备技术应用与难点

通道式制备技术已经实现了部分硝基、硝酸酯、叠氮、氮杂环类含能材料的连续安全合成,包括液体含能材料(硝化甘油、硝酸异辛酯、含能增塑剂 NENA)、固体含能材料(LLM-105、硝基胍、ADN)等。其中,部分硝酸酯类液体含能材料的通道式合成已完成工业示范运行,充分展示出了通道式制备安全高效的优势(*Bradley Sleadd, Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2019, 22164.*)。基于含能材料通道式制备的优势,美国 LLNL 国家实验室、德国 ICT 研究院等国外军事研究机构在技术研究基础上,已具备了初具规模的含能材料通道式合成能力。目前,国内在含能材料通道式合成方面研究活跃,取得了显著进展,但多集中在基础科研领域,距应用尚有距离;通道式制备技术也逐渐应用于含能材料晶体形貌、晶型以及聚集结构等过程调控,准确调控结晶环境,可实现形貌、粒径等晶体形态的精细化调控。但不论含能材料合成还是结晶,通道式制备技术还主要集中于液相或低固含量体系。如何实现高固高黏度体系的通道式制备,仍是极具挑战性难题。新型通道反应器的设计及超声、声共振等过程的辅助协同,有望提供解决方案和策略。

作为新的制备模式,发展含能材料通道式制备的安全性评估技术、过程分析技术迫在眉睫,构建相应标准规范体系极其重要,相关内容已引起含能材料工作者的重视,相关研究正在开展中,研究成果必将进一步丰富含能材料通道式制备技术内涵。

## 2. 含能材料通道式制备技术发展趋势与思考

作为一种创新技术,通道式技术在含能材料制备方面已表现出极大的优势和潜力,但目前仍属起步阶段,尚有诸多基础科学问题和工程应用难题亟待研究和突破。未来可针对以下三个方面开展进一步的研究工作:

### (1) 建立多样化技术手段和方法,揭示深层次反应机理与机制

目前,含能材料通道式制备技术多集中在工艺技术的开发,通道式反应深层次机理及机制认知尚待形成,高固相体系的堵塞难题尚未得到有效解决。通过超声、声共振等与通道式制备技术的协同设计及应用(*Joe Mayne, Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2022, 24843.*),在抑制固相沉淀方面已初见成

效,为高固体含能材料通道式合成研究提供了很好的解决方案和策略。在机制研究方面,通过仿真建模、理论计算和实验验证相结合的方式,加深含能材料通道式制备过程强化机制的研究,揭示微尺度下传递、反应及其耦合与调控机制。同时,发展通道式过程分析技术,将多种在线检测手段与反应系统进行集成,实现制备过程工艺参数可视化,形成多尺度贯通的研究手段和方法,建立对含能材料通道式制备技术的科学认知体系。

### (2) 构建技术体系标准及方法,指导技术应用与发展

在含能材料通道式制备的工艺研发中,仍通过大量试错法获得相关数据,缺乏工艺适用性评价准则,亟需建立标准体系及方法,用以指导技术的应用和发展。运用正向设计方法建立釜式工艺向通道式工艺转换的方法体系,加强通道式工艺与设备的匹配设计与开发,实现含能材料制备工艺的快速开发及其与设备的深度融合。建立通道式技术的工艺适用性和安全性评价准则,从反应器的设计、反应热风险评估、反应体系的研判及安全等级的评价方面着手,建立通道结构类型、工艺参数和安全阈值数据库,形成指导含能材料通道式制备的行业规范与标准。

### (3) 加强多链条技术互通,实现多领域交叉融合

含能材料通道式制备技术不仅可以助力新型含能分子的高效研发,更利于生产环节上多工序的连续化制备。基于通道连续流动模块的智能平台的开发,证实了集成通道式、自动化和机器学习等先进技术在实现新物质高通量筛选与制备上的可行性(C W Coley, et al. *Science*, 2019, 365: 1566; S Chatterjee, et al. *Nature*, 2020, 579: 379.)。因此,打通分子设计、连续化合成、在线检测、数据分析、智能决策、优化迭代等多个流程,通过将自动化技术、机器学习技术与通道式技术深度融合,构建含能材料智能化高通量合成平台,是未来新型含能材料创新开发的重要载体。加强含能材料反应、洗涤、过滤、干燥等多工序集成的全链条互联互通,开展通道式制备前后处理工序的自动化、连续化匹配设计和关键技术验证,形成数智化工程装备的核心技术与能力,是推动含能材料通道式制备技术深度发展的重要理念。

## 3. 总结

作为含能材料领域的新兴技术,通道式制备技术的优势显而易见,已经得到广大科研工作者的认可和高度关注,技术内涵日趋丰富和完善,但工程应用阶段仍面临着诸多挑战。然而,挑战与机遇并存,越来越多的科研人员投身于含能材料通道式制备技术领域的研究,不断探索与开发新的含能材料体系和制备技术,聚力关键核心技术研究攻关,正为通道式制备科学技术难题提出创新性解决方案。不容忽略的是,任何先进技术都具有两面性,通道式制备技术不是万能的,并不适用于所有的含能材料体系,自身也存在短板和缺陷,但也正因为如此,才更值得含能材料科研人员去深度研究和挖掘,从而实现产-学-研的深度贯通和创新性、突破性成果的转化运用。这也是推动含能材料通道式制备技术长远发展的内生动力,是通道式制备技术在含能材料制备中的真正价值和意义。

范桂娟, 张祯琦

中国工程物理研究院化工材料研究所  
e-mail: fangj609@caep.cn