

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0027-07

# 微流控技术合成叠氮类起爆药工艺研究

宁爵勇<sup>1,2</sup>, 周楠<sup>3</sup>, 刘津搏<sup>1,2</sup>, 周星屹<sup>1,2</sup>, 朱朋<sup>1,2</sup>, 沈瑞琪<sup>1,2</sup>

(1.南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 2.微纳含能器件工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京, 210094; 3.北京航天长征飞行器研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 为提高起爆药合成工艺的本质安全性, 设计和组建了基于混沌流混合芯片的微流控制制备系统, 利用在微尺度条件下流体的高效混合, 制备出2种典型离子盐叠氮类起爆药: 叠氮化铅(LA)和叠氮化银(SA); 研究了不同流速、晶型控制剂对LA起爆药的影响; 对比了微流法和常规法2种工艺制备的SA, 并研究了微流法SA的撞击敏感性和静电敏感性。结果表明: 不同的反应流速对LA的晶体形貌和粒径分布产生影响; 在微反应体系中合成的SA粒径分布在712.4~1106.4 nm之间, 平均粒径为871.6 nm, 相对较窄, 并且对撞击和静电钝感。研究表明基于微流控技术的连续流合成工艺是一种安全有效、快速制备叠氮类起爆药的方法。

**关键词:** 起爆药; 微流控; 叠氮化铅; 叠氮化银; 粒径; 感度

中图分类号: TJ55; TQ563 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.006

## Synthesis Technique of Azide Primary Explosives by Microfluidics Technology

NING Jue-yong<sup>1,2</sup>, ZHOU Nan<sup>3</sup>, LIU Jin-bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Xing-yi<sup>1,2</sup>, ZHU Peng<sup>1,2</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing, 210094; 3. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing, 100076)

**Abstract:** To improve the intrinsic safety of the primary explosive synthesis process, a microfluidic preparation system based on a chaotic flow mixing chip was designed and assembled, two typical salt-like primary explosives such as Lead Azide (LA) and Silver Azide (SA) were prepared by the efficient mixing of fluids under microscale condition. The effects of different flow rates and crystal control agents on LA were investigated. The SA prepared by microfluidic and conventional processes were compared, and impact sensitivity and electrostatic sensitivity of microfluidic SA were also investigated. The results show that the control of the reaction flow rate has an impact on the crystal morphology and particle size distribution of LA. The particle size distribution of SA synthesized in the micro-reaction system is ranged from 712.4 nm to 1106.4 nm, with an average particle size of 871.6 nm, which is much narrower, meanwhile, the SA synthesized by microfluidics is blunt to impact and electrostatic forces. The study indicates the continuous flow synthesis process based on microfluidic technology is a safe and effective method for the rapid preparation of azide primary explosives.

**Key words:** Primary explosives; Microfluidics; Lead azide; Silver azide; Particle size; Sensitivity

起爆药是一类易被火焰、热、撞击、摩擦、静电火花等非爆炸方式的简单初始刺激而引燃/引爆的敏感炸药<sup>[1]</sup>。国内外的常规起爆药包括叠氮化物、重氮化物及重金属的硝基酚盐等。其中, 叠氮类起爆药被

广泛使用。目前, 起爆药的实验室合成主要是利用釜式反应器在溶液中进行化合反应, 依次进行过饱和溶液的形成、晶核生成、晶体生长和晶体聚集等过程<sup>[2]</sup>, 最终实现晶体析出。由于常规反应器内不同区域反应

收稿日期: 2023-03-03

作者简介: 宁爵勇(2000-), 男, 在读硕士研究生, 从事微流控制备含能材料技术研究。

通讯作者: 朱朋(1978-), 男, 研究员, 从事爆炸箔起爆微系统、微流控芯片和微化学反应技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金(No.22075145)。

环境的差异较大,从而导致所合成的起爆药常以不同的结晶形态出现,聚晶颗粒和单晶颗粒相互掺杂,产物的粒径分布较宽。这直接影响到火工品的装药性能,进一步影响到包括感度、起爆威力等在内的爆炸性能及整个生产、装配过程的安全性<sup>[3]</sup>。

近年来,随着芯片实验室和桌面工厂概念的提出,小型微反应系统已成为产品开发的重要工具<sup>[4]</sup>。微反应系统又称为微流控系统,是由微通道和微结构组成、具有功能性和完成特定任务的微流体系统<sup>[5]</sup>,已广泛应用于多种化合物的合成。在含能材料领域,微流控技术的应用研究也发展迅速<sup>[6-8]</sup>。Kyripanou 等<sup>[9]</sup>使用微流控系统研究了克级规模 2,4-二硝基甲苯(DNT)硝化成 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)的过程,实现了硝化合成反应的高安全连续和全自动化操作。Delville 等<sup>[10]</sup>采用一种小规模半自动化的连续流装置从苯胺生产叠氮苯,表明在小体积和高度控制的反应条件下,连续流微反应器是合成潜在爆炸性化合物的理想系统。微流控合成技术在调控物质的物理性质方面也具有卓越的能力,与宏观合成相比显示出明显的优势<sup>[11]</sup>。微尺度下反应器内连续流动加强了质量和热量的传递,导致快速的反应混合,并且能够精确控制反应参数,提高整个过程的选择性、效率和安全性,适用于起爆药的高品质安全合成与粒度调控<sup>[12-14]</sup>。周楠、赵双飞等<sup>[15-16]</sup>基于液滴微流控系统开展了微尺度条件下硝基酚类起爆药的粒度与粒径分布调控,与常规方法合成所得的斯蒂芬酸铅(LTNR)和斯蒂芬酸钡(BaTNR)相比,通过该液滴流合成系统制备的晶体具有更窄的粒径分布和更加均匀的形貌。微流控技术还在实现人机隔离,促进包括起爆药在内的含能材料制备的自动化、智能化发展,提升含能材料制备本质安全性等方面具有很大潜力<sup>[17-19]</sup>。

本研究利用微流控技术在其合成过程中的优势,设计、组建了典型离子盐起爆药的微流控混沌流合成系统,以叠氮化铅(Lead Azide, LA)和叠氮化银(Silver Azide, SA) 2种典型叠氮类起爆药为例,进行微尺度下合成实验研究,并开展最优反应参数的筛选工作,在提高合成过程安全性的同时改善起爆药的物理/化学性能。

## 1 实验

### 1.1 芯片仿真设计和性能评价

典型离子盐起爆药的成核过程和生长过程均受扩散作用的影响,扩散作用的增强可改善其合成过程中的反应环境,进而提高其反应效率并改善目标产物质量。因此,需要针对性地对芯片进行设计以提高反应液的混合效果。

为增强微尺度条件下流体介质的混合效率,系统设计了混沌流微混合芯片,用于合成 SA 和 LA,如图 1 所示。

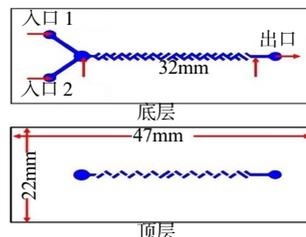


图 1 用于起爆药合成的混沌流微混合芯片构型与尺寸

Fig 1 Configuration and dimensions of chaotic flow microchip for primary explosives synthesis

混沌流微混合芯片由一个圆形腔室和多个三维交叉“X形”微通道构成,交叉通道彼此垂直,宽度和深度均为 0.5 mm,并且与该微混合芯片的主轴线成 45°。微混合芯片的交替“X”形微通道存在间歇性变向以避免混合“死区”。因 SA 和 LA 的反应速率过快,接触瞬间即生成细小沉淀物,极易造成微通道的堵塞。为避免微通道堵塞,在三维交叉通道前端设计有一圆形腔室,其直径和深度分别为 2.5 mm 和 0.5 mm。两者均采用 1.8 mm 厚 PMMA 数控微铣削(端铣刀为 7256Φ0.25, DIXI)加工而成,可以承受高达 85 °C 的温度。

利用有限元分析软件 Ansys/Fluent, 选用层流模型对两类混沌流微混合芯片的混合性能进行数值模拟,默认待求解流体为定常流动的不可压缩牛顿流体。同时,以浓度方差来评估流体的混合程度,具体可表示为<sup>[20]</sup>:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2 / N} \quad (1)$$

式(1)中: $\bar{c}$ 为物质或组分在所截面积处的平均浓度,  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $N$ 为所选区域的网格数;  $\sigma$ 为标准

偏差, 其值在 0~0.5 之间, 0 代表完全混合, 0.5 代表未混合。

反应液的性质与液态水类似, 故选用密度  $\rho$  为  $9.998 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、粘度  $\mu$  为  $9 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、运动扩散系数  $D$  为  $2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的液态水作为工作介质。考虑到微通道由热塑性塑料 PMMA 构造, 其特征尺度远远大于 10 nm, 且通道的壁面由于加工技术的原因不可避免的存在一定的粗糙度, 故在壁面处选用无滑移边界条件。先后对混沌流微混合芯片进行建模以及网格划分, 并对网格加密以验证所获得的数据与网格密集性无关。

入口 1 的质量分数设为 1, 相应的颜色为红色; 入口 2 的质量分数设为 0, 相应的颜色为蓝色。入口 1 和入口 2 反应液流量  $Q_1/Q_2$  依次设置为 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 mL/min, 以研究不同流量下该混沌流微混合芯片的混合性能, 数值计算结果如图 2 所示。

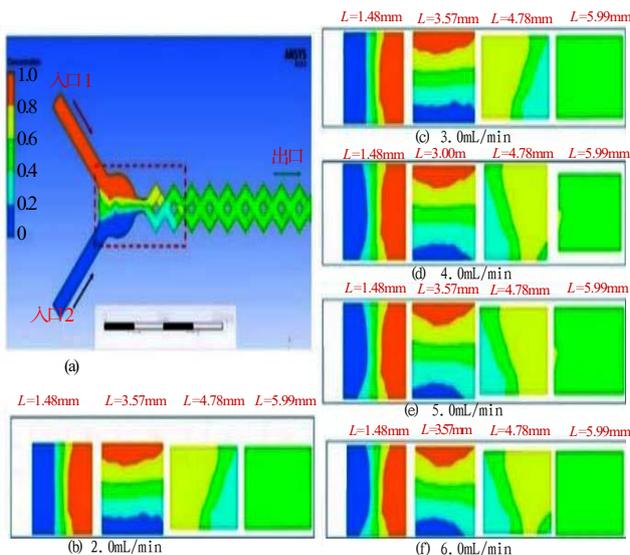


图 2 混沌流微混合芯片在不同流量下选定区域内的混合结果  
Fig.2 Mixing results of the chaotic flow micro-mixing chip in selected areas at different flow rates

如图 2 所示, 当流量从 2.0 mL/min 增加至 6.0 mL/min 时, 均在距混沌流微混合芯片入口 5.99 mm 处实现完全混合, 相应的混合时间分别为 115.0, 76.7, 57.5, 46.0, 38.3 ms, 相应的滞留时间分别为 460, 306, 230, 183, 153 ms。由此可见, 随着流量的增加, 混合效率显著增强, 可在短时间实现完全混合。

## 1.2 系统设计与搭建

混沌流合成系统示意图如图 3 所示, 系统采用四

路并联方式扩大目标物产量, 以克服单路微流控系统产量小的问题。

单路系统主要包括 5 个部分: (1) 计算机控制单元, 用于程序控制流体驱动单元以特定的流速驱动相应流体; (2) 流体驱动单元, 用于推动合成 SA 或 LA 所需的相关反应液或添加剂进入后续单元, 计算机控制单元和流体驱动单元共同组成进样单元; (3) 预热单元, 用于预先对相关反应液进行加热以尽量避免微通道的堵塞; (4) 结晶单元, 包括温度控制装置 (数显恒温水浴锅) 和混沌流微混合芯片, 分别用于提供外部热源和实现相关反应液快速混合, 进而生成 SA 或 LA 的悬浮液; (5) 分离单元, 用于实现废液与固体产物的分离工作。

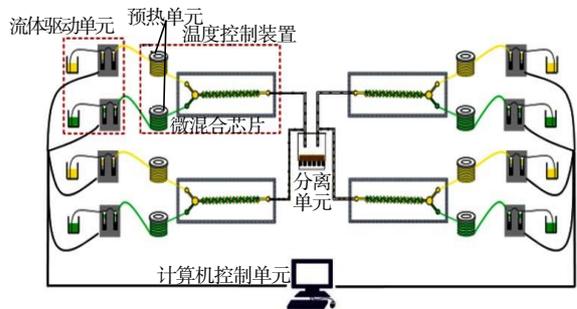


图 3 混沌流合成系统整体方案示意图

Fig.3 Schematic diagram of the chaotic flow synthesis system

## 1.3 实验过程

### 1.3.1 叠氮化铅制备

生成叠氮化铅的反应原理如下:



将  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  和  $\text{NaN}_3$  以 1:2 的物质的量浓度分别溶解于去离子水中配置成溶液, 调节硝酸铅溶液 pH 至 7.0~7.5, 叠氮化钠溶液 pH 至 4~5。依次完成混沌流合成系统的管道连接, 并借助盘管器调整预热单元长度为 2m, 开启温度控制装置, 设置预热单元 (结晶单元) 温度为  $65^\circ\text{C}$ , 等待温度加热至设定温度。并将硝酸铅溶液和叠氮化钠溶液分别置于流体驱动单元, 在计算机控制单元设置好流速后, 开启流体驱动单元, 以一定的流速推动反应液在预热单元内完成升温, 流入混沌流微混合芯片, 经持续拉伸、折叠和分裂、变向和重组等作用实现反应液快速均匀混合。从混沌流芯片出口得到的悬浮液产物经过滤固液分离, 洗涤, 水浴烘箱  $50^\circ\text{C}$  干燥, 得到叠氮化铅样品。

### 1.3.2 叠氮化银制备

叠氮化银经硝酸银水溶液与叠氮化钠水溶液经复分解反应制得，其反应原理如下：



配制相同物质的量浓度的硝酸银和叠氮化钠溶液，并调节相应 pH 值。反应液以一定的流速在计算机控制的流体驱动单元推动下，经过预热加温、混沌流微芯片混合以及后处理，得到叠氮化银样品。图 4 为混沌流合成系统实物图。

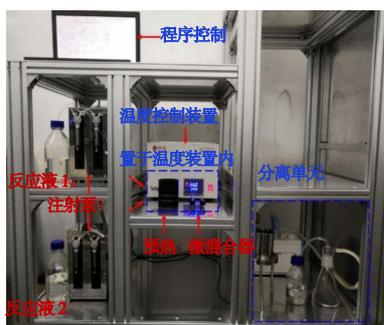


图 4 混沌流合成系统

Fig.4 Physical diagram of chaotic flow synthesis system

## 2 结果与讨论

### 2.1 叠氮化铅起爆药的制备及表征

#### 2.1.1 流速对 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 制备的影响

为了确定合适的流速，研究了反应液流速对结晶  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  晶体形貌和粒径分布的影响。固定硝酸铅溶液浓度为 0.1 mol/L，叠氮化钠溶液浓度为 0.2 mol/L，其流速依次设为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mL/min。利用扫描电子显微镜 (SEM) 对不同流速下结晶  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的晶体形貌进行表征，并结合 5 组样品的粒径分布做进一步讨论，其结果如图 5 所示。

由图 5 可见，制备的  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒呈柱状或椭球状，平均粒径  $D_{50}$  分别为 1.28, 1.28, 1.11, 1.28, 1.11  $\mu\text{m}$ 。当流速为 3.0 mL/min 时，利用混沌流合成系统制得的  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  晶体形貌相对规整，大部分呈椭球形，粒径分布相对较窄，分布在 712.4~1 483.9 nm 之间。由于反应液在通道内的滞留时间与总流速成反比。当流速从 1.0 mL/min 增加至 5.0 mL/min，相应的滞留时间逐渐减少。因此，合适的滞留时间对结晶  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的晶体形貌和粒径分布至关重要。

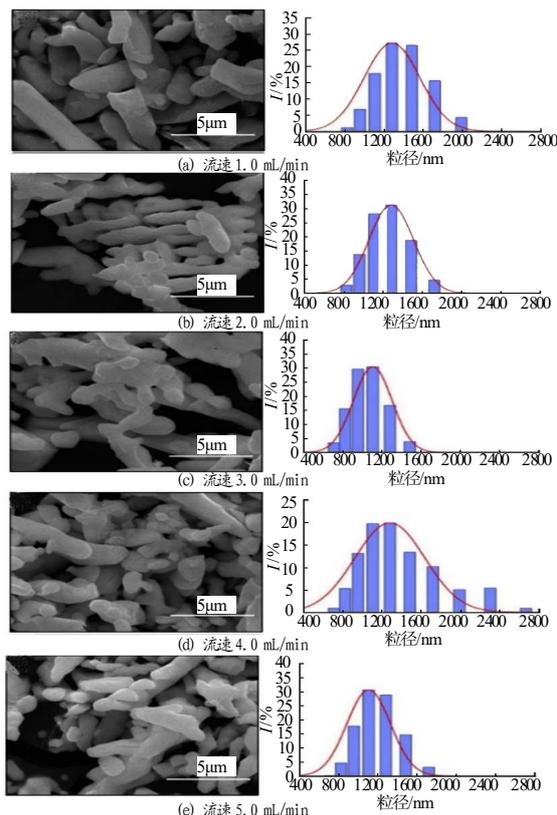


图 5 不同流速下结晶  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒的 SEM 图像和 PSD 分析  
Fig.5 SEM images and PSD analysis of crystalline  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  particles at different flow rates

#### 2.1.2 晶型控制剂对叠氮化铅制备的影响

离子盐型起爆药晶体析出的实质是在过饱和度的推动下实现固-液多相离子平衡的移动，析出过程包括晶体的成核和生长两种过程。晶体成核速率是指在单位时间内、单位体积中所形成的核的数目。

对于 LA 的合成反应而言，反应温度、溶质、溶液及浓度均固定，成核速率主要取决于固-液两相表面张力和相对过饱和度。其中晶型控制剂的添加影响固-液两相表面张力，从而改变 LA 晶体形貌和性能。针对目前常规叠氮化铅起爆药系列品类，研究了糊精、聚乙烯醇和羧甲基纤维素钠 3 种晶型控制剂在混沌微流系统对合成叠氮化铅的影响。配制 0.1 mol/L 的硝酸铅溶液，0.2 mol/L 的叠氮化钠溶液，2 g/L 的糊精溶液、聚乙烯醇溶液，1 g/L 的羧甲基纤维素钠溶液。3 种晶型控制剂分别均以 5% 的体积分数添加到叠氮化钠溶液中，固定硝酸铅溶液和叠氮化钠溶液流速为 3.0 mL/min，研究晶型控制剂对叠氮化铅起爆药结晶行为的影响。SEM 及粒径分布结果如图 6 所示。

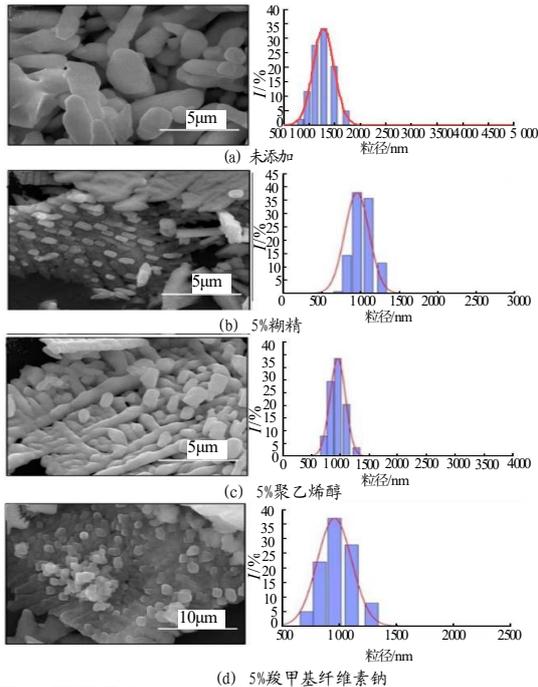


图6 不同晶型控制剂制备的  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒的 SEM 图像和 PSD 分析

Fig. 6 SEM images and PSD analysis of  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  particles prepared with different crystalline control agents

由图 6 可见, 晶型控制剂的添加明显改善  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒的晶体形貌,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒由长短不一的柱状与椭球形混杂转变为规则的短柱状。与此同时, 由于添加晶型控制剂后溶液粘度提高, 使得颗粒间发生聚集, SEM 图像上显示出由短柱首尾相接构成的层状结构。由 PSD 分析可知, 3 种 5% 浓度的不同晶型控制剂所制备的  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  粒径分布区间为 712.4 ~ 1 483.9 nm,  $D_{50}$  分别为 955.4, 955.4, 1 106.4 nm。

进一步对上述实验条件下所合成的糊精  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 、聚乙烯醇  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  和羧甲基纤维素钠  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  进行热分解性能测试, 样品质量均约为 0.25 mg, 其 DSC 曲线如图 7 所示。

DSC 曲线显示,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  反应过程均可分为缓慢热分解过程和快速热分解过程(热爆炸过程)。但是, 在加入糊精后,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的缓慢放热过程有所提前, 且放热量有所减少; 而  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的快速放热过程大幅度后移, 放热量同样减少。在未添加晶型控制剂时,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的快速热爆炸过程开始于 345.3 °C, 峰值温度为 347.3 °C, 放热量为 738.2 J·g<sup>-1</sup>; 添加 5% 糊精后,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的快速热爆炸过程开始于 411.6 °C, 峰值温度为 430.9 °C, 放热量为 341.6 J·g<sup>-1</sup>。糊精的加入使得叠

氮化铅的热安定性大幅度提高, 并且大大降低了放热速率, 放热量较未添加糊精时也大幅度减少。

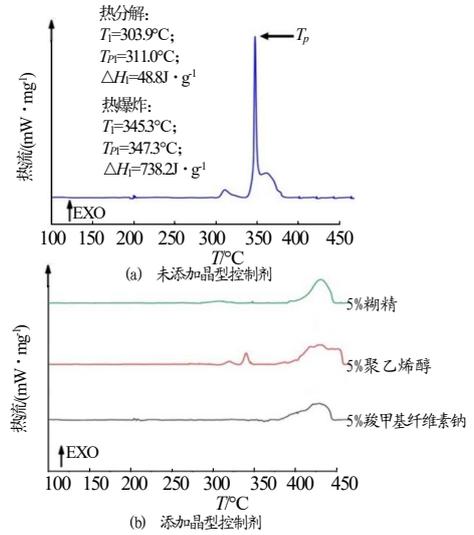


图 7 不同晶型控制剂制备的  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  DSC 曲线

Fig. 7 DSC curves of  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  prepared with different crystal control agents

由图 7 (b) 可见, 添加 5% 聚乙烯醇  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的反应过程也分为缓慢热分解和快速热分解 2 个阶段。聚乙烯醇的加入使放热过程大幅度后延, 峰值温度由 347.3 °C 变为 433.9 °C, 叠氮化铅的热安定性大幅度提高。但同时也大大降低了放热速率, 放热量也大幅度减少。由此可见, 聚乙烯醇在改善叠氮化铅晶体形貌的同时提高了叠氮化铅热安定性, 但其对于叠氮化铅放热量的影响同样不可忽视。反应过程中应选用粘度相对较低的聚乙烯醇, 在改善晶体形貌的同时尽可能减少其含量, 这对于提高叠氮化铅纯度和放热量均可起到促进作用。此外, 添加 5% 羧甲基纤维素钠叠氮化铅 DSC 曲线显示, CMC- $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  颗粒的缓慢热分解过程很微弱, 主要是快速热分解过程。 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  的热爆炸过程开始于 382.5 °C, 峰值温度为 430.1 °C, 放热量为 542.3 J·g<sup>-1</sup>。

## 2.2 叠氮化银起爆药的制备及表征

### 2.2.1 微流法和常规法制备的叠氮化银对比

参照叠氮化铅微流控制备方法, 以硝酸银溶液和叠氮化钠溶液制备出叠氮化银起爆药。在相同实验参数下, 利用常规方法合成叠氮化银作为对照实验。主要步骤如下: 配制 40 mL 浓度均为 0.1 mol/L 的硝酸银溶液和叠氮化钠溶液, 分别调节其 pH 至 7.5~8.0

和 7.0~7.5。在 65 °C 的水浴环境下,于 30min 内将叠氮化钠均匀滴加至硝酸银溶液内,并持续搅拌。待加料完毕后,继续搅拌 5min。通过真空过滤收集叠氮化银颗粒,并用去离子水冲洗。按 40 mL 的实验液量计算,利用常规方式完成单次实验需 35min。

XRD、PSD 和 SEM 测试结果如图 8 所示。图 8 (a) XRD 结果表明,2 组样品的衍射峰均与标准卡 (PDF # 03-0906) 中衍射峰的位置非常吻合。因此,2 种方法合成的叠氮化银具有相似的晶体结构。但是,2 组样品衍射峰的强度不同,常规方法合成的  $\text{AgN}_3$  部分衍射峰强度非常微弱甚至消失,这意味着某些晶面的生长非常微弱,例如 (132), (312), (004) 和 (114) 面。

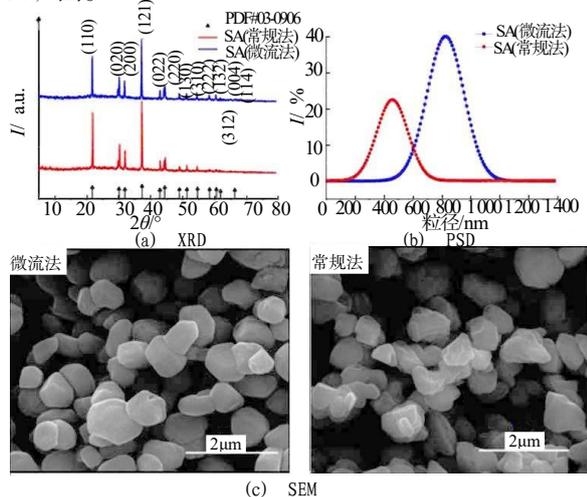


图 8 常规法与微流法制备的  $\text{AgN}_3$  对比  
Fig. 8 Comparison of  $\text{AgN}_3$  by microfluidic and conventional methods

由图 8 (b) 可见,利用混沌流合成系统合成的  $\text{AgN}_3$  粒径在 712.4 ~1 106.4 nm 之间,平均粒径为 871.6 nm;常规方法合成的  $\text{AgN}_3$  粒径在 255.0~825.0 nm 之间,平均粒径为 465.1 nm。由此可见,利用混沌流合成系统合成的  $\text{AgN}_3$  粒径大于常规方法合成的  $\text{AgN}_3$ ,且粒径分布相对较窄。粒径增大的原因是混沌流微混合芯片的引入强化了晶体生长过程中的扩散作用,导致晶体生长速率显著提高。由图 8 (c) 可见,利用混沌流合成系统合成的  $\text{AgN}_3$  晶体多呈球形或类球形,具有良好的流散性;常规方法合成的  $\text{AgN}_3$  晶体大多呈金字塔形且带有尖锐点。

### 2.2.2 感度表征

为了评估由混沌流合成系统合成的  $\text{AgN}_3$  的安全

性能,研究其撞击敏感性和静电敏感性。使用 BAM 落锤仪测试由微流控方法合成的叠氮化银的机械感度,在 20 J 的撞击能量下对由微流控方法最优条件下合成的叠氮化银重复测试 5 次,结果发现 5 次均未发火。由此可见,由微流控方法合成的叠氮化银对撞击钝感,同样具有纳米化钝感这一特性,其发火所需的撞击能量高于 20 J,能够满足安全使用的要求。

同时,利用 JGY-50III 型静电火花感度仪对该样品进行静电放电 (ESD) 测试,评估其静电安全性。测试系统由充电回路和放电回路构成,电极与样品间距离设为 0.12 mm。测试能量可由公式  $E=1/2CU^2$  计算。固定充电电压为 20 kV,对同一条件下制得的叠氮化银进行 5~10 次称取,每组样品约 10 mg。结果发现:20 kV 下所有样品均未发火。由此可见,微流控方法制得的  $\text{AgN}_3$  发火所需的能量高于 0.1 J,相对钝感,能够满足安全使用的要求。

## 3 结论

(1) 本文设计了一种混合增强的混沌流微混合芯片,组建了桌面式混沌流微反应合成系统,用于开展 LA 和 SA 2 种叠氮类起爆药合成实验研究,验证了该微流控合成系统的适用性,并对相关工艺参数进行筛选,获得了部分优选反应参数。

(2) 利用混沌流系统所制得的叠氮类起爆药具有晶形规整、结晶度高、粒径分布窄等特点,兼具优良的热安定性。对混沌流系统合成的  $\text{AgN}_3$  进行相关测试后发现,由微流控系统合成的  $\text{AgN}_3$  对撞击和静电钝感。

(3) 研究表明,微流控技术在流动合成叠氮类起爆药过程具有一定优势,可以兼顾起爆药生产品质和安全性的要求,并且在单通道微流控系统的基础上开展微流控系统并联技术研究可以实现其高通量参数优化筛选和满足工业化生产需求。

### 参考文献:

[1] 张建国,张至斌,许彩霞.起爆药[M].北京:北京理工大学出

- 版社, 2016.
- [2] 张建国,张同来.起爆药的结晶控制技术与单晶培养[J]. 火工品, 2001(1): 50-54.
- [3] 劳允亮.起爆药化学与工艺学[M].北京:北京理工大学出版社, 1997.
- [4] Yoshida J, Nagaki A, Yamada T. Flash chemistry: fast chemical synthesis by using microreactors[J]. Chemistry-A European Journal, 2008, 14(25): 7 450-7 459.
- [5] 沈瑞琪,朱朋,叶迎华,等.危险化学物质的微流控合成与制备技术[J].科技导报,2018,36(16):46-52.
- [6] Zhao S, Chen C, Zhu P, et al. Passive micromixer platform for size-and shape-controllable preparation of ultrafine HNS[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(36): 16 709-16 718.
- [7] Shi J, Zhu P, Zhao S, et al. Continuous spheroidization strategy for explosives with micro/nano hierarchical structure by coupling microfluidics and spray drying[J].Chemical Engineering Journal, 2021,412(1): 128 613.
- [8] Zhou X, Zhu P, Shi J, et al. Self-assembly assisted by microdroplet templates confinement for the preparation of ultramixed composite energetic particulates[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,454(2):140 204.
- [9] Kyprianou D, Berglund M, Emma G, et al. Synthesis of 2, 4, 6-Trinitrotoluene (TNT) using flow chemistry[J]. Molecules, 2020, 25(16): 3 586.
- [10] Delville M M E, Nieuwland P J, Janssen P, et al. Continuous flow azide formation: optimization and scale-up[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 167(2-3): 556-559.
- [11] Jahn A, Reiner J E, Vreeland W N, et al. Preparation of nanoparticles by continuous-flow microfluidics[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2008, 10(6): 925-934.
- [12] Zhou N, Zhu P, Rong Y, et al. Microfluidic synthesis of size-controlled and morphologically homogeneous lead trinitroresorcinate produced by segmented flow[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(5): 899-905.
- [13] Zhao S, Yan F, Zhu P, et al. Micro-segmented flow technology applied for synthesis and shape control of lead styphnate micro-particles[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(3): 286-293.
- [14] 韩瑞山,张方,卢飞朋,等.微流控技术制备叠氮化铅起爆药及其改性[J].含能材料,2022,30(5):451-458.
- [15] 周楠.典型硝基酚类起爆药的嵌段流合成及结晶过程研究[D].南京:南京理工大学,2016.
- [16] Zhao S, Zhou N, Zhu P, et al. Optimization synthesis of morphologically homogeneous and rod-like structure barium trinitroresorcinate produced by segmented flow[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2018, 51(6): 524-529.
- [17] Visaveliya N, Knauer A, Köhler J M. Application of polyionic macromolecules in micro flow syntheses of nanoparticles[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2017, 218(2): 160 037 1.
- [18] Movsisyan M, Delbeke E I P, Berton J, et al. Taming hazardous chemistry by continuous flow technology[J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(18): 4 892-4 928.
- [19] Weifei Y, Zhiyong W, Ruijuan X, et al. Explosive synthesis: novel intrinsically safe method and application with micro-channel reactor[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020.
- [20] Tsai R T, Wu C Y. An efficient micromixer based on multi-directional vortices due to baffles and channel curvature[J]. Biomicrofluidics, 2011, 5(1): 014 103.