文章编号：1003-1480（2025）05-0091-08

基于微流控技术的HNS-Ⅳ粒径与发火性能关系研究

程泽宇[1]，袁浩方[1]，王晓飞[2]，刘津搏[1]，陈 军[3]，朱 朋[1]

（1. 南京理工大学 化学与化工学院，江苏 南京，210094；2. 陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061；3. 湖北东方化工有限公司，湖北 襄阳，441404）

摘 要：六硝基芪（Hexanitrostilbene，HNS）作为爆炸箔起爆器（Exploding Foil Initiator,EFI）的许用装药，其性能直接影响到 EFI 的作用效果。本研究利用微流控技术制备了 3 种不同粒径的 HNS-IV（D_{50} 分别为 633，411，239 nm），并对其晶形结构、晶体形貌、爆压和发火感度等进行了表征和测试。结果表明，微流控技术能够制备不同粒径且形貌均一的 HNS-IV。随着 HNS-IV的 D_{50} 从 633 nm 降至 239 nm，兰利法测得的起爆阈值下降了 18.7%，光子多普勒测速系统（PDV）测试并计算得到的爆压增加了 12.3%。随着 HNS-IV粒径的减小，其热稳定性逐渐降低，而对短脉冲的敏感度及爆压随之提升。但当粒径减小到一定程度时，不同粒径 HNS 的发火性能差异呈现收敛趋势。

关键词：HNS-IV；微流控；粒径分布；爆炸箔起爆器（EFI）；发火性能

中图分类号：TJ55 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.012

Study on the Relationship between Particle Size and Firing Property of HNS-IV Based on Microfluidic Technology

CHENG Ze-yu[1]，YUAN Hao-fang[1]，WANG Xiao-fei[2]，LIU Jin-bo[1]，CHEN Jun[3]，ZHU Peng[1]

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094；
2. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061；3. Hubei Oriental Chemical Co. Ltd., Xiangyang, 441404)

Abstract：Hexanitrostilbene (HNS) is a licensed charge for Exploding Foil Initiator(EFI), and the performance of the agent directly affects the effect of EFI. In this paper, three different particle sizes of HNS-IV (D_{50} of 633, 411, 239 nm) were prepared by microfluidic technology, and their crystal structure, crystal morphology, explosion pressure, and firing sensitivity were characterized and tested. The results show that HNS-IV with different particle sizes and homogeneous morphology can be prepared using microfluidic technology. As the D_{50} of HNS-IV decreases from 633 nm to 239 nm, the initiation threshold measured by the Langley method is dropped by 18.7%, and the explosion pressure tested and calculated by Photonic Doppler Velometer (PDV) is increased by 12.3%. With the reduction of HNS-IV particle size, its thermal stability decreases, while its sensitivity to short pulses and explosion pressure increase. However, when the particle size decreases to a certain extent, the differences in firing property between HNS with different particle sizes show a convergent trend.

Key words：HNS-IV；Microfluidics；Particle size distribution；Exploding foil initiator(EFI)；Firing property

六硝基芪（Hexanitrostilbene，HNS）是一种耐热且低敏感度的炸药，在军事和民用领域应用广泛[1]。特别是满足高比表面积（5~25 $m^2 \cdot g^{-1}$）、高纯度的超细 HNS-IV，在保留 HNS 炸药钝感性的同时，还具

收稿日期：2025-04-09

作者简介：程泽宇（2001-），男，在读硕士研究生，主要从事爆炸箔起爆器和 HNS 性能研究。

通讯作者：朱朋（1978-），男，研究员，主要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）。

引用本文：程泽宇，袁浩方，王晓飞，等.基于微流控技术的 HNS-Ⅳ粒径与发火性能关系研究[J]. 火工品, 2025(5):91-98.

备对小飞片短脉冲冲击敏感的特性，是爆炸箔起爆器的许用炸药[2]。

国内外学者普遍认为炸药粒径是影响其性能的关键因素之一。对于 PETN、HNS 等单质炸药装药，当颗粒变得细小时，冲击片起爆阈值显著降低[3]。即颗粒越细，炸药对冲击片这类短脉冲就越敏感，而对机械撞击类的长脉冲则变得钝感。实际的感度测试结果也充分证实了这一点[4]。例如，60～80 目的 HNS-II炸药撞击感度为 60%~76%，其装药不能被冲击片起爆；当 HNS 炸药颗粒被细化到亚微米级别（比表面积约为 12 $m^2 \cdot g^{-1}$）时，撞击感度大幅下降至 28%，并且很容易被冲击片起爆。王培勇等[5]通过爆炸箔冲击片试验，研究了粒径在 0.53 ~8.53 μm 之间的药剂粒径与窄脉冲起爆感度之间的变化规律，结果显示高纯 HNS 粒度越小，药剂窄脉冲起爆能量也随之降低。

粒径对冲击灵敏度的影响是难以预测的。冲击灵敏度可能随着晶粒尺寸的增大而减小，也可能呈现非单调变化，这取决于冲击灵敏度试验的类型和具体条件。Setchell[6]和 Wasch[7]均发现，在 2.4 ~4.0 GPa 的冲击压力下，大粒径的 HNS 比小粒径的 HNS 更加敏感。但 Schwarz[8]发现，当冲击压力增加时，这种冲击灵敏度的反转效应就会消失。

在上述研究中，大多集中于粒径对 HNS-IV炸药起爆感度的影响，而关于热性能和爆压方面的研究相对较少。此外，这些研究中的炸药粒径大多处于微米级别。随着技术的进步，比如降温结晶[9]、机械研磨法[10]、溶剂-非溶剂法[11]、喷雾干燥[12]、超临界流体法[13]等物理或化学细化方法的发展，如今已经能够在亚微米尺度对 HNS 的粒径进行调控。

为此，本文采用溶剂-非溶剂法，通过微流控结晶平台制备了 3 种不同粒径的 HNS-IV（D_{50}<1 μm），深入研究了不同粒度下 HNS-IV的热性能和发火性能，并对不同粒度下 HNS-IV的性能差异进行了初步分析。

1 试验

1.1 试剂与仪器

二甲亚砜（DMSO），分析纯，国药化学试剂有限公司；无水乙醇，分析纯，国药化学试剂有限公司；去离子水，自制；六硝基芪(HNS-IV)，实验室自制。

微流控结晶平台，课题组自主研发；真空抽滤泵，型号 XZ-1，上海予善机械有限公司；超纯水机，型号 CS-10B，上海力辰邦西仪器科技有限公司。

1.2 不同粒径 HNS-IV样品制备

溶剂-反溶剂法是重结晶制备微纳米炸药的常用方法。微流控技术因其高效的传质传热性能、精准的参数控制能力以及本质安全性，在炸药的结构形态调控方面展现出显著优势[14]。在本研究中，采用 DMSO 作为溶剂，去离子水作为反溶剂，在课题组自行搭建的微流控结晶平台[15]中进行 HNS 炸药重结晶实验。微流控结晶系统的核心部件是共轴聚焦流微混合器[16]，如图 1 所示。

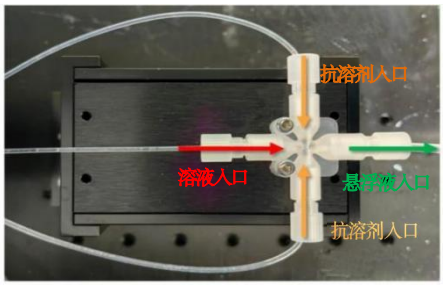


图 1 共轴聚焦式微混合器实物图

Fig.1 Schematic diagram of coaxial focusing micromixer

通过调节微混合器中流体的流动参数，可以促使流体层之间发生不同程度的径向动量交换，进而产生多种流动状态，从而达到调控 HNS 粒径的目的。微流控重结晶参数设置见表 1。

表 1 微流控重结晶参数设置

Tab.1 Microfluidic recrystallization parameter setting

HNS-IV 类型	炸药溶液流量 Q_i/(mL·min^{-1})	去离子水流量 Q_o/(mL·min^{-1})	流量比 R
A	5	10	2
B	10	20	2
C	10	30	3

将 HNS 炸药浓度设定为 12 mg·mL^{-1}，依据表 1 给定参数配置溶剂和反溶剂流量，在微流控结晶平台上进行重结晶，制得炸药悬浮液。通过真空抽滤、乙醇洗涤、超声震荡和冷冻干燥步骤，最终获得 HNS-IV。

1.3 不同粒径 HNS-IV性能表征研究

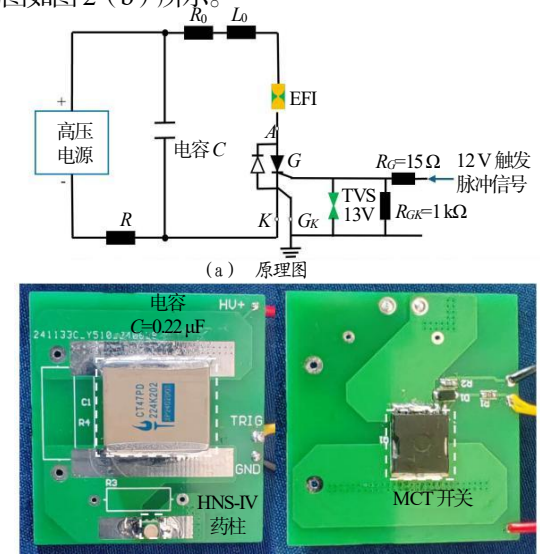
采用扫描电子显微镜（Nova Nano SEM，美国 FEI 公司）对 HNS-IV的微观形貌特征进行观察；通过激光粒度仪（BT-Online 2，丹东百特仪器有限公司）测

定粒径分布，测量时采用体积分布法；利用全自动比表面及孔隙度分析仪（Quantachrome Autosorb NOVA 2200e，美国）测定比表面积。

利用 X 射线衍射仪（D8-X-Ray advanced diffractometer，德国 Bruker 公司）对 HNS-IV的晶体结构进行表征，测试条件为铜靶，扫描范围 5~70°，扫描速度为 10°·min^{-1}。

通过差示扫描量热法（DSC，TGA/DSC1/1600，瑞士 Mettle-Toledo）研究 HNS-IV的热分解行为及动力学性能，设置升温速率分别为 5，10，15，20 K·min^{-1}，测试温度范围为 25~450 ℃，在 N_2 氛围下进行，进气速率为 20 mL·min^{-1}。

HNS-IV的发火感度测试依据 GJB/Z 377A-94 感度试验用数理统计方法，采用兰利法进行计算分析。HNS-IV药柱采用压制技术成型，具体尺寸为Φ2.3 mm × 2 mm，密度为（1.57±0.02）g·cm^{-3}。试验中使用的电容为 C_0=0.22 μF，放电单元原理如图 2（a）所示，实物图如图 2（b）所示。



（a）　原理图

（b）　实物图

图 2　HNS-IV 发火感度试验中电容放电单元原理图和实物图

Fig.2　Schematic and physical diagrams of capacitor discharge unit in HNS-IV firing sensitivity test

HNS-IV的爆压可通过界面粒子速度法测定，其测试系统如图 3 所示。该测试系统由光子多普勒测速仪（Photonic Doppler Velocimetry，PDV）、爆炸箔起爆器、待测炸药样品和镀有 Al 膜的 LiF 玻璃测试窗组成。为确保爆轰波达到稳态条件，在爆压测试过程中增加了炸药的用量，将 HNS-IV药柱的尺寸设定为Φ4 mm × 4 mm，将压药密度增大至 1.60 g·cm^{-3}。为确保 3 种类型的 HNS-IV均能被有效起爆，起爆电压统一设定为 1 800 V，试验所用电容 C_0=0.4 μF。

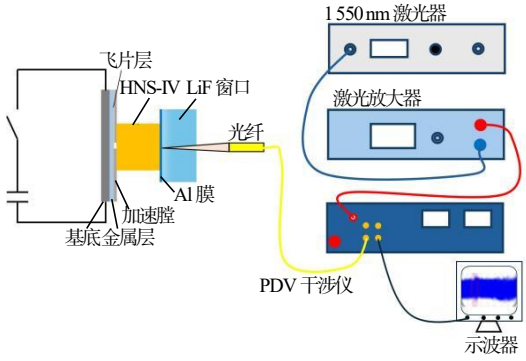


图 3　爆压测试系统示意图

Fig.3　Schematic diagram of explosion pressure testing system

在待测样品的端面安装尺寸为Φ8 mm × 4 mm 的 LiF 窗口，其与炸药紧密贴合的一端镀有 500 nm 厚的 Al 膜。炸药起爆后，通过测量炸药与窗口的界面粒子速度 u_{cj}，并结合阻抗匹配公式，可以计算出待测炸药的爆压。PDV 的典型曲线示意图如图 4 所示。

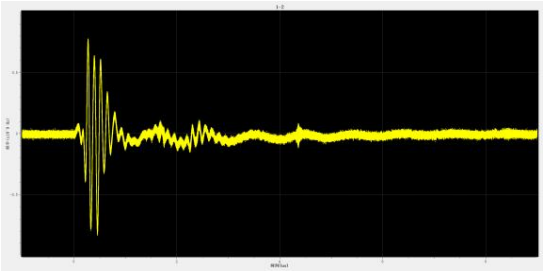


图 4　PDV 典型曲线示意图

Fig.4　Schematic diagram of typical PDV curve

2　结果与讨论

2.1　不同粒径 HNS-IV 的微观形貌分析

对表 1 设定重结晶参数条件下制备的 HNS -IV 进行粒度分析，得到的结果如表 2 所示。

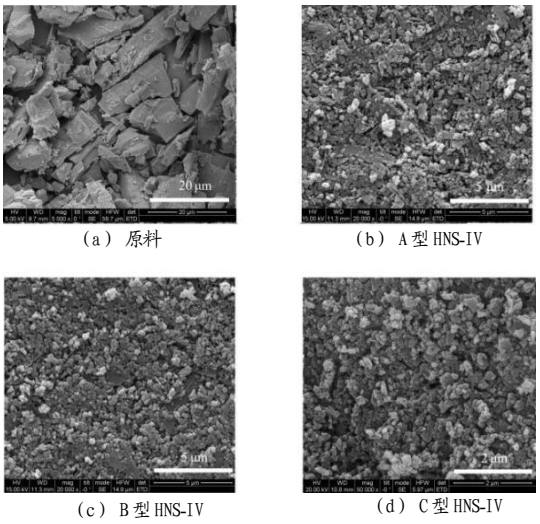
表 2　不同重结晶参数设置下 HNS-IV的粒度分布

Tab.2　Particle size distribution of HNS-IV under different recrystallization parameters setting

HNS-IV 类型	D_{10} /μm	D_{50} /μm	D_{90} /μm	S_p	体积平均粒径 $D_{[4,3]}$/μm
A	0.413	0.633	0.916	0.795	0.648
B	0.245	0.411	0.652	0.990	0.434
C	0.208	0.239	0.257	0.205	0.236

注：S_p 为粒度分布数，S_p=(D_{90}–D_{10})/D_{50}，D_{10}、D_{50}、D_{90} 为体积分数分别累计到 10%、50%、90%的粒度，μm。

由表 2 可知，在不同的参数条件下，HNS-IV具有不同的粒径分布和体积平均粒径 $D_{[4,3]}$。通过 SEM 对原料和 3 种不同类型 HNS-IV进行微观形貌的观察，结果如图 5 所示。



（a） 原料　（b） A 型 HNS-IV

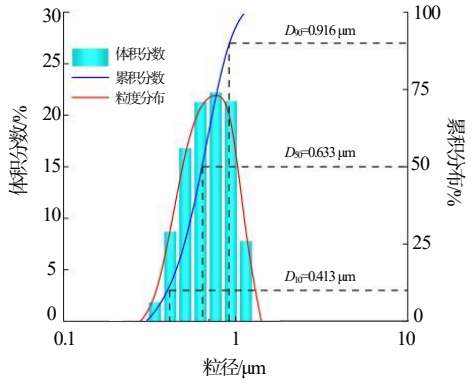
（c） B 型 HNS-IV　（d） C 型 HNS-IV

图 5　原料及 3 种类型 HNS-IV的 SEM 形貌图

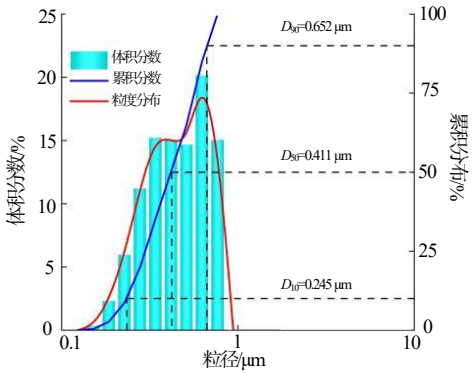
Fig.5　SEM images of raw material and three types of HNS-IV morphology

经过重结晶处理后，HNS 的形貌和粒径均有了较大的改变。从图 5（a）可以看出，原料 HNS 的晶体形貌表现出不均匀性，主要以体积较大的块状晶体为主，同时存在小块的片状晶体附着于块状晶体表面。经过重结晶后的 3 种 HNS-IV的 SEM 图如图 5（b）~（d）所示，结果显示，重结晶后的 HNS 主要为小颗粒状，整体形貌较为均一。

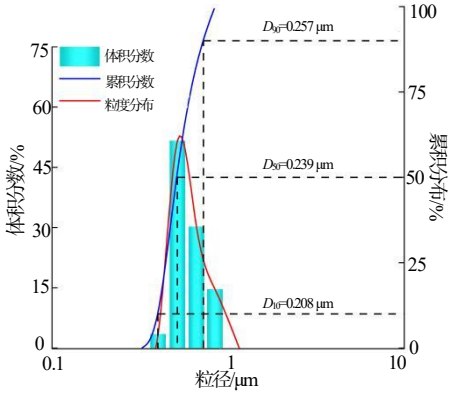
为探究重结晶后 HNS-IV的粒度分布特征，使用激光粒度分析仪对 3 种 HNS-IV样品的粒径进行了测定，并以体积分布作为表征 HNS-IV粒径分布的参数，得到的粒径分布图如图 6 所示。



（a） A 型 HNS-IV



（b） B 型 HNS-IV



（c） C 型 HNS-IV

图 6　3 种 HNS-IV粒径分布图

Fig.6　Particle size distribution diagrams of three types of HNS-IV

由图 6 可以看出，3 种 HNS-IV的粒径分布曲线均呈现出相对集中的单峰形态。而在 A 型 HNS-IV中存在粒径大于 1 μm 的颗粒，其余 2 种类型 HNS-IV样品的粒径均在 1 μm 以内。3 种 HNS-IV的体积平均粒径呈现逐渐减小的趋势，这一发现为后续不同粒径 HNS-IV的发火性能研究提供了基础数据。

XRD 用来表征重结晶后 HNS 的晶型，结果如图 7 所示。研究结果表明，3 种 HNS-IV的衍射峰位置基本一致，在 2θ为 8.1，14.8，16.8，17.9，23.1，23.6，24.2° 处均有较强的衍射峰，这些峰位与 HNS 的标准衍射图谱（PDF-42-1919）相匹配。这一结果证明了经过重结晶处理的 HNS 样品保持了与标准样品相同的晶体结构。

利用全自动比表面及孔隙度分析仪测定了 3 种 HNS-IV的比表面积，结果如图 8 所示。由图 8 可见，随着 A、B、C 3 种 HNS-IV粒径的逐渐减小，HNS-IV的比表面积呈现逐渐增大的趋势，而这种增大趋势

亦呈现出逐渐减弱的态势。

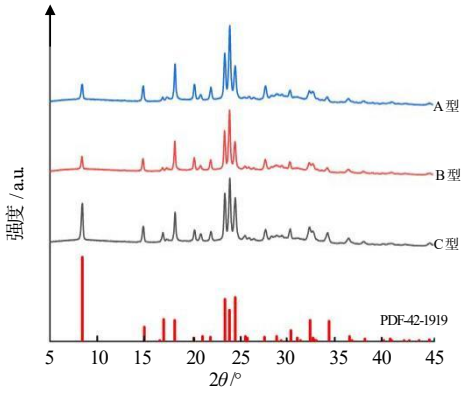


图 7　3 种 HNS-IV的 XRD 图

Fig.7　XRD patterns of three types of HNS-IV

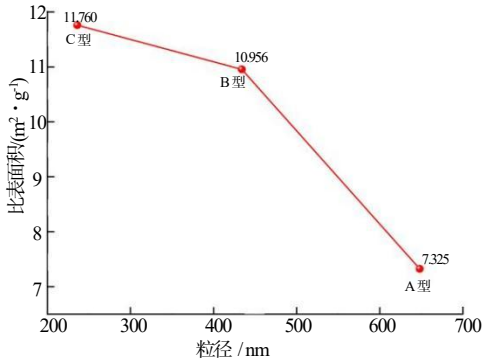


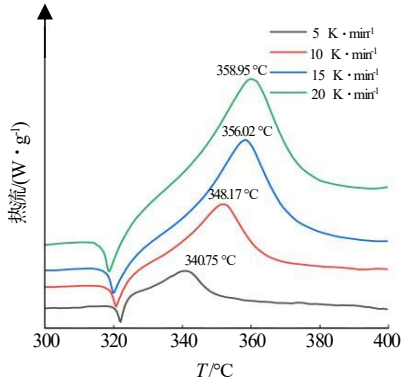
图 8　3 种 HNS-IV的比表面积

Fig.8　Specific surface area of three types of HNS-IV

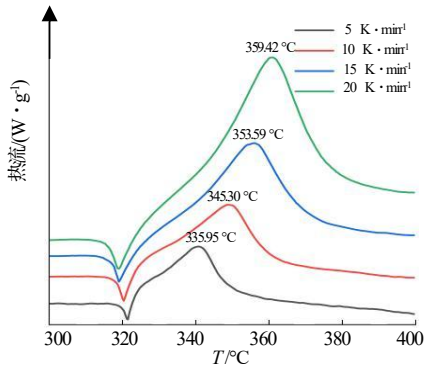
2.2　不同粒径 HNS-Ⅳ的热分解性能

为研究不同粒径 HNS-IV的热分解性能差异，在 5，10，15，20 K·min^{-1} 升温速率下进行了 DSC 试验，得到了 3 种 HNS-IV的 DSC 曲线，如图 9 所示。

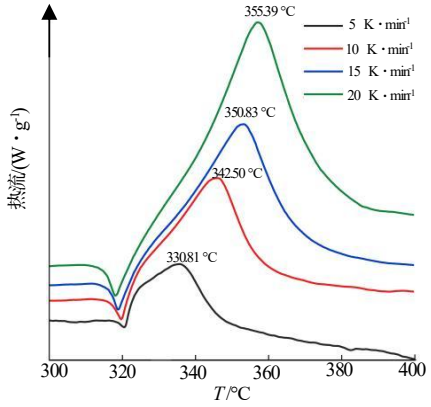
由 3 种 HNS-IV的 DSC 曲线图可知，随着 A、B、C 3 种 HNS-IV体积平均粒径 $D_{[4,3]}$的减小，HNS-IV出现热分解现象时的峰值温度也在下降，但这种趋势随着升温速率变高逐渐减弱。



（a） A 型 HNS-IV



(b) B 型 HNS-IV



(c) C 型 HNS-IV

图 9　3 种 HNS-IV的 DSC 曲线图

Fig.9　DSC curves of three types of HNS-IV

采用 Ozawa 法[17]，用式（1）计算 HNS-IV的表观活化能（E_a），以 lgβ为纵坐标，1/T_p 为横坐标，获得拟合直线，样品的表观活化能 E_a 可由斜率确定。

$$\frac{\mathrm{d}(\lg\beta)}{\mathrm{d}(\frac{1}{T_p})}=-0.456\,7\frac{E_a}{\mathrm{R}} \qquad (1)$$

式（1）中：β为升温速率，K·s^{-1}；T_p 为 DSC 曲线的峰值温度，K；E_a 为表观活化能，kJ·mol^{-1}；R 为气体常数（8.314 J · K^{-1}·mol^{-1}）。

热爆炸临界温度 T_b 是用来评价炸药热安全性能的一个重要参数，可通过非等温 DSC 曲线由式（2）计算获得，其中 T_{p0} 按式（3）由线性回归计算。

$$T_b=\frac{E_a-\sqrt{E_a^2-4E_a\mathrm{R}T_{p0}}}{2\mathrm{R}} \qquad (2)$$

$$T_{pi}=T_{p0}+b\beta_i+c\beta_i^2+d\beta_i^3 \qquad (3)$$

式（2）~（3）中：T_b 为热爆炸临界温度，K；E_a 为表观活化能，kJ · mol^{-1}；R 为气体常数（8.314 J · K^{-1} · mol^{-1}）；T_{p0} 为加热速率趋于零时 DSC 曲线

上外推始点温度或峰温，K；T_{pi}为 DSC 曲线上峰温，K；β_i为升温速率，K·min^{-1}；b、c、d 为常数。

计算得到的 3 种 HNS-IV 的表观活化能及热爆炸临界温度见表 3。

表 3　3 种 HNS-IV的表观活化能和热爆炸临界温度

Tab.3　Apparent activation energy and thermal explosion critical temperature of three types of HNS-IV

HNS-IV类型	表观活化能 E_a/(kJ·mol^{-1})	热爆炸临界温度 T_b/℃
A	223.39	353.74
B	178.33	344.74
C	166.89	326.94

为了更直观地体现粒径对 HNS-IV热性能的影响，将表 3 中数据以柱状图的形式呈现，如图 10 所示。

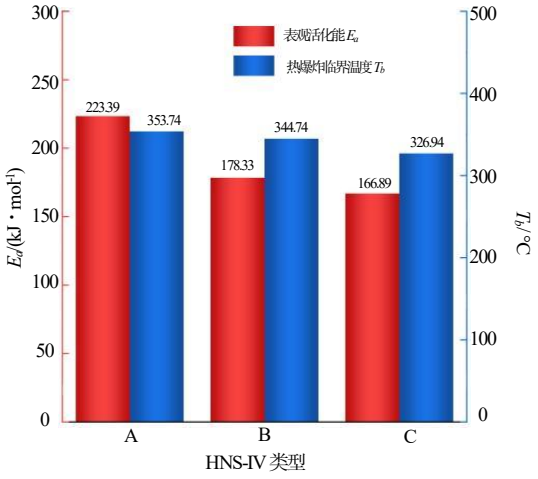


图 10　3 种 HNS-IV 的表观活化能与热爆炸临界温度对比图

Fig.10　Comparison of apparent activation energy and thermal explosion critical temperature for three types of HNS-IV

由图 10 可以看出，随着 A、B、C 3 种类型 HNS-IV 粒径的减小，其表观活化能和热爆炸临界温度均呈现出下降趋势。具体而言，表观活化能受粒径影响较大，而热爆炸临界温度受粒径影响较小。这两种参数的降低均表明，粒径的减小会导致 HNS-IV热稳定性的降低，并相应地增加了发火感度。

2.3　不同粒径 HNS-IV 的爆压和冲击发火感度

采用基于光子多普勒测速（Photonic Doppler Velocimetry，PDV）技术，通过界面粒子速度法来测定爆轰波阵面与窗口界面的粒子速度。结合阻抗匹配计算方法，从而准确获得 HNS-IV 装药的爆轰压力。经过数据提取，得到了 3 种 HNS-IV的界面粒子速度历程图，如图 11 所示。

图 11 明确标示了样品在爆轰时 CJ 点的粒子速度 u_{cj}。

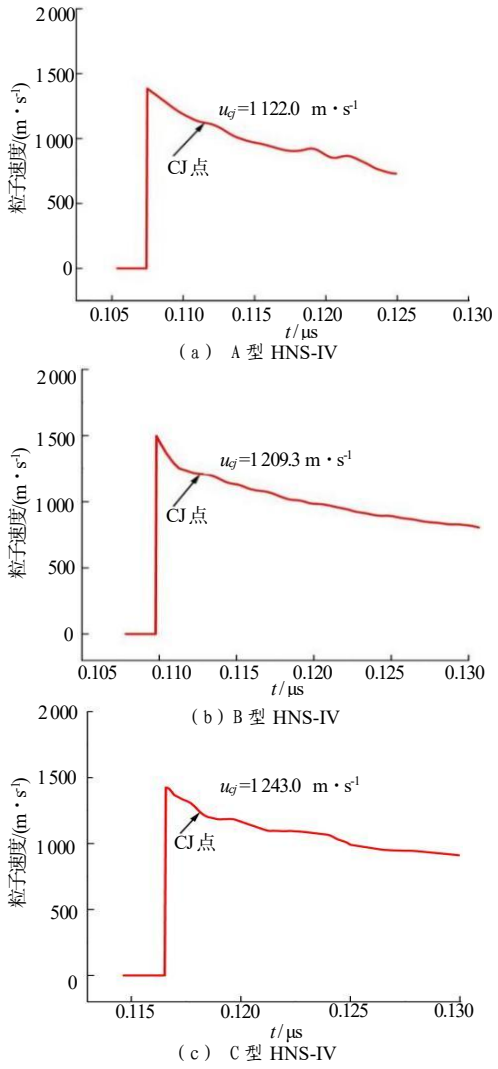


图 11　3 种 HNS-IV的界面粒子速度历程图

Fig.11　Velocity history diagrams of interfacial particles for three types of HNS-IV

在冲击波的作用下，LiF 玻璃的折射率会发生变化，因此，需要对试验测量得到的粒子速度采用式（4）进行修正，将修正后的粒子速度数据代入式（5）计算，从而得到爆压，并且，采用兰利法计算了 3 种 HNS-IV的冲击发火感度，计算结果如图 12 所示。

$$u=\frac{u_{cj}}{1.267\,8} \tag{4}$$

$$p_{cj}=\frac{1}{2}u_{cj}[\rho_{w0}(C_w+\lambda u_{cj})+\rho_0 D_{cj}] \tag{5}$$

式（4）~（5）中：p_{cj}为待测炸药的爆压，GPa；u_{cj}为 CJ 点对应的界面粒子速度，km·s^{-1}；ρ_{w0}为窗体材料的初始密度，ρ_{w0}=2.641 g·cm^{-3}；C_w为窗体材料的冲击绝热线常数，C_w=5.176 km·s^{-1}；λ为窗体材

料的冲击绝热线常数，λ=1.353；ρ_0 为待测炸药的初始密度，ρ_0=1.60 g·cm^{-3}；D_{cj} 为待测炸药的 CJ 爆速，D_{cj}=5 250 km·s^{-1}。

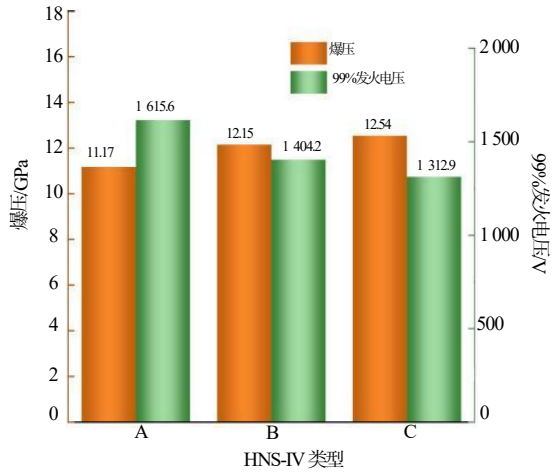


图 12　3 种 HNS-IV的发火感度与爆压对比图

Fig.12　Comparison of firing sensitivity and explosion pressure for three types of HNS-IV

图 12 显示，试验测得 HNS-IV的爆炸压力远低于理论值（C-J 压力在 21 GPa 左右，密度 1.6 g·cm^{-3} 条件下的模拟结果），可归因为实验中 HNS-IV用量少和径向约束不足[18]。尽管如此，实验表明 HNS-IV粒径减小与爆炸压力增加呈正相关。粒径从 0.648 μm 降至 0.236 μm 时，爆炸压力提升了 12.3%。比较不同粒径 HNS -IV的爆炸压力，发现粒径差异相同时，爆炸压力差异随粒径减小而减小。

同样由图 12 可知，HNS-IV的发火电压随着粒径减小而降低，感度提高，这与热爆炸临界温度的变化趋势相符。说明粒径减小会降低其热爆炸临界温度，增大发火感度，减小发火电压。然而，尽管热起爆临界温度下降明显，但发火电压的下降趋势有所减缓，表明两者之间的关系并不紧密。另外，从图 8 可以看出，随着 A、B、C 3 类 HNS-IV粒径的逐渐减小，HNS-IV的比表面积逐渐增大，但增大趋势也在逐渐减弱，这与粒径对 HNS-IV起爆阈值的影响趋势一致。因此可以初步判断，粒径是通过影响 HNS-IV的比表面积从而影响其冲击发火感度。

学术界普遍认为，含能材料的起爆机理源于炸药在压缩作用下形成的局部热点[19]。热点的形成机制包括晶间绝热压缩效应和材料内部结构缺陷[20]。对于 HNS-IV炸药，较小粒径的晶体在压药密度和药柱体积恒定时，表现出更显著的热点生成特性，因为粒径减小增加了单位体积内晶体数量，引发更显著的颗粒间摩擦效应。小粒径炸药的更大比表面积和颗粒间隙特征，使得在冲击压缩过程中形成更多热点。从爆轰动力学角度分析，材料密度恒定时，爆轰成长过程主要受化学反应速率控制。颗粒尺寸减小导致比表面积增长，提升表面反应活性，使得小粒径 HNS-IV在冲击作用下更容易实现快速热传导和能量释放，显著降低起爆阈值。

3　结论

本文通过微流控技术制备了 3 种粒度梯度的 HNS-IV，表征了不同粒径 HNS-IV的发火性能和热性能，并对不同粒度下 HNS-IV的性能差异进行了初步分析，得到的结论如下：

（1）通过微流控技术能够制备粒径可调、晶体形貌均一的 HNS-IV，为后续研究粒径与炸药的发火性能之间的关系提供了一种简单高效的方法。

（2）减小粒径可有效降低 HNS-IV的表观活化能和热爆炸临界温度，分别从 223.39 kJ·mol^{-1}、353.74 ℃下降到 166.89 kJ·mol^{-1}、326.94 ℃，相比于粒径对热爆炸临界温度的影响，其对活化能的影响更大。

（3）随着粒径的减小，HNS-IV的爆压和冲击发火感度都在增加，爆压从 11.17 GPa 增加到 12.54 GPa，相对增加了 12.3%，冲击起爆阈值也由 1 615.6 V 下降到 1 312.9 V，降低了 18.7%。粒径通过影响 HNS-IV的比表面积来升高其冲击发火感度，减小粒径有望筛选出高能量、高冲击发火感度的 HNS-IV。

（4）HNS-IV的性能与粒径并不呈线性相关，随着粒径的减小，HNS-IV性能的提升变得愈加不明显。

综上所述，减小 HNS-IV的粒径可以有效提升其爆轰性能和发火感度。这些发现为优化 HNS-IV在含能材料中的应用提供了重要的实验依据和理论支持。

未来的研究可以进一步探索如何通过控制粒径和其他物理化学特性来优化 HNS-IV的综合性能。

参考文献：

[1] 朱中钦,邵艳丽,林秋汉,等.耐热炸药六硝基芪的制备及应用研究进展[J].火炸药学报, 2018,41(4):9-15.

[2] Guo W., Wu L.Z., He N.B., et al. Efficiency relationship between initiation of HNS-IV and nanosecond pulsed laser-driven flyer plates of layered structure[J]. Laser and Particle Beams,2018,36(1):29-40.

[3] Grief D,Coley G D.小型冲击片雷管性能判定[C]//美英火工品及相关专业资料译文集.西安:全国军用火工品标准化技术委员会,1998.

[4] 董海山,周芬芬,编. 高能炸药及相关物性能[M].北京:科学出版社,1989.

[5] 王培勇, 史春红, 张周梅, 等. 高纯HNS粒度对冲击片起爆感度的影响[J]. 火工品, 2011(4): 29-31.

[6] Setchell R E. Grain-size effects on the shock sensitivity of hexanitrostilbene (HNS) explosive[J]. Combustion and Flame, 1984,56(3): 343-345.

[7] Waschl J, Richardson D. Effect of specific surface area on the sensitivity of hexanitrostilbene to flyer plate impact[J]. Journal of Energetic Materials, 1991, 9(4): 269-282.

[8] Schwarz AC. Shock initiation sensitivity of hexanitrostilbene (HNS)[C]//Seventh Symposium (International) on Detonation. Naval Weapons Surface Center, NSWC MP 82-334, 1981.

[9] 王平,秦德新,聂福德,等. HNS 的细化工艺研究[J]. 含能材料,2001,9(4):153-155.

[10] 盛涤伦,马凤娥. 高纯高比表面积 HNS 的研究[J].火工品,2001(3):34-37.

[11] 杨丽媛. 多孔 HNS 的溶剂化-去溶剂化方法制备及机械感度和冲击起爆性能研究[D]. 太原:中北大学, 2019.

[12] 吕春玲, 张景林, 黄浩. 微米级球形 HNS 的制备及形貌控制[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 35-38.

[13] 张艳,林志文,张东平. 超临界反溶剂法细化 HNS 的工艺研究[J]. 广东化工,2019,46(24):59-60.

[14] 石锦宇,朱朋,沈瑞琪. 微流控技术调控炸药结构形态的研究进展[J]. 含能材料,2022,30(5):511-526.

[15] 夏皓轩,石锦宇,刘津搏,等. 微流控结晶系统制备窄分布微米级硝胺炸药[J]. 含能材料,2024,32(3):256-269.

[16] 朱朋,石锦宇,沈瑞祺,等.基于共轴聚焦微混合器的微纳米炸药制备系统及方法:CN, 113694782B[P].2023-05-06.

[17] Ozawa T.A new method of analyzing thermogravimetricdata [J].Bull Chem SccJPn,1965,38(1):1 881-1 886.

[18] 舒俊翔, 裴红波, 黄文斌, 等. 几种常用炸药的爆压与爆轰反应区精密测量[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(5): 89-98.

[19] Miller P J，Coffey C S，Devost V F. Heating in crystalline solids due to rapid deformation[J].Applied Physics,1986, 59(3)：913-916.

[20] Stepanov V, Krasnoperov L N, Elkina I B. Production of nanocrystaline RDX by rapid expansion of supercritical solutions[J].Propellants,Explosives,Pyrotechnics,2005,30(3):178-183.