文章编号：1003-1480（2025）05-0099-08

微流体特性对纳米HNS液滴生成的影响机制

刘 立[1,3]，翟 喆[2]，王 蒙[1]，刘 硕[1]，王 成[3]，朱 朋[1]

（1. 南京理工大学 化学与化工学院，江苏 南京，210094；2. 中国兵器科学研究院，北京，100089；3. 四川华川工业股份有限公司，四川 成都，610105）

摘 要：为探究微流体特性对纳米六硝基芪（Hexanitrostilbene，HNS）液滴生成过程的影响及其对微球粒径分布的作用机制，采用共轴聚焦流液滴制备技术，并结合实时动态监测手段，通过控制变量法深入分析了微流体特性对纳米六硝基芪液滴生成模式、频率及尺寸的影响，进而揭示了滴流、射流及不稳定射流的微观特征对 HNS 微球粒径分布的作用。研究发现，相较于不稳定射流模式，在滴流和射流模式下制备的纳米 HNS 微球具有更优的单分散性。基于两相流量、连续相粘度以及分散相固含量对液滴生成特性的定量影响规律，本研究实现了对微球制备粒径（233.0～515.8 μm）和生成频率（5.8～188.7 Hz）的精确控制，为含能微球的制备提供了实验基础和理论支持。

关键词：液滴微流控；纳米六硝基芪；含能微球；液滴生成模式

中图分类号：TJ55；TQ564 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.013

Mechanism of Microfluidic Properties on Nano-Hexanitrostilbene Droplet Generation

LIU Li[1,3], ZHAI Zhe[2], WANG Meng[1], LIU Shuo[1], WANG Cheng[3], ZHU Peng[1]

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094；2. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing, 100089；3. Sichuan Huachuan Industrial Co. Ltd., Chengdu, 610105)

Abstract： Aimed to explore the influence of microfluidic properties on the droplet generation process of nano-hexanitrostilbene (HNS) and its mechanism in regulating the particle size distribution of microspheres, using coaxial flow - focusing droplet generation technology combined with real - time monitoring, the influence of microfluidic properties on HNS droplet formation modes, frequency, and size was analyzed by controlled - variable experiments. Furthermore, the microscopic characteristics of dripping, jetting, and unstable jetting modes influencing on the particle size distribution of HNS microspheres were revealed. Experimental results demonstrate that nano-HNS microspheres prepared under dripping and jetting modes exhibite superior monodispersity compared to those generated under unstable jetting conditions. Based on quantitative analyses of the impact of two-phase flow rates, continuous-phase viscosity, and dispersed-phase solid content on droplet generation dynamics, precise control over the microsphere size range (233.0~515.8 μm) and generation frequency (5.8~188.7 Hz) is achieved, which provides experimental evidence and theoretical support for the fabrication of energetic microspheres.

Key words：Droplet microfluidics；Nano-HNS；Energetic microspheres；Droplet formation mechanism

六硝基芪（Hexanitrostilbene, HNS）因其具有良好的物理、化学稳定性，对静电火花不敏感，抗辐射性能强，被广泛用于耐热爆破器材及航天火工品[1-3]。高纯超细的 HNS-IV对窄脉冲敏感，是钝感弹药直列

收稿日期：2025-04-30

作者简介：刘立（2001-），男，在读博士研究生，主要从事微流控和微化学反应技术研究。

通讯作者：朱朋（1978-），男，研究员，主要从事微流控和微化学反应技术、爆炸箔起爆微系统技术研究。

基金项目：国家自然科学基金（No.22375096）。

引用本文：刘立，翟喆，王蒙，等. 微流体特性对纳米 HNS 液滴生成的影响机制[J]. 火工品, 2025(5):99-106.

式传爆序列和冲击片雷管的理想装药[4-5]。但 HNS-IV 的高表面能和高表面电荷密度容易导致颗粒团聚、结块，降低了其流散性，且装药时端面容易产生缺陷，不利于直接用于雷管装药[6-7]。而将纳米 HNS 制备成微球，可有效改善纳米 HNS 的流散性和成型性能[8]。

液滴微流控技术为微球制备提供了新方法，其核心是通过微尺度流体精准操控，将两相流体（如水相和油相）剪切生成高度均一的液滴作为模板，再结合固化手段实现微球可控合成[9-11]。该技术通过微通道或外部力场（如电场、声波）精确调控流体动力学特性，可连续生成单分散液滴（尺寸偏差通常小于 5%），克服了传统宏观制造方法批次差异大、粒径分布宽的局限[12-14]。液滴微流控技术适配多种材料体系（如高分子聚合物、水凝胶、无机前驱体等），还可通过多相流体分层包裹或逐层固化，制备核壳、多孔、多层异质结构微球，拓展功能化应用场景[15-16]。

液滴微流控技术作为高效制备均一微球的方法，已被用于含能微球的制备。Han R 等[6]通过流动聚焦型通道制备 HNS 微球，分析了黏结剂含量及固含量对其尺寸参数和结构的影响。李少群等[17]探究了不同两相流体流动模式对硝化棉微球形貌和粒径的影响。武碧栋团队[7,18-21]采用流动聚焦及共流聚焦微通道成功制备 HNS 微球，解决了超细 HNS 高表面能、低球形度、易团聚结块等问题。但现阶段研究多聚焦于制备工艺、微球微观形貌及宏观性能，对流体流动特性、液滴生成参数（直径与频率）、液滴生成模式之间的关联性还缺少相关研究。

鉴于液滴微流控技术与在线监测手段高度适配，可利用高速相机监测液滴生成过程，从而分析液滴生成动态机制。本文采用液滴微流控技术对 HNS 球形药进行粒度调控，通过观察微观流体细节揭示纳米 HNS 微球制备过程的液滴生成模式，分析纳米 HNS 液滴生成的内在机制，建立液滴生成模式与微球粒径分布的关联特征。通过控制变量法改变两相流量、流体物性（连续相粘度、分散相固含量）等参数，揭示不同微流体特性对液滴生成模式、频率和尺寸的影响，为含能微球粒度制备提供实验基础与理论支撑。

1 实验

1.1 试剂与仪器

实验材料：纳米六硝基芪（HNS-IV），纯度 98.8%，中值粒径 348 nm，实验室自制；聚乙烯醇（PVA），平均分子量 1 750 ± 50，国药集团；氟橡胶（F_{2602}），工业级；乙酸乙酯（EA），分析纯，国药集团；去离子水，实验室自制。

实验仪器：共轴聚焦型微通道，分散相通道（内径 0.25 mm，外径 0.5 mm）；连续相通道（内径 0.86 mm，外径 1.26 mm），实验室自制。注射泵，型号 TS-1B，兰格公司；玻璃注射器，5 mL，上海玻利鸽工贸有限公司；FEP 管（内径 1.2 mm，外径 2.0 mm），润泽流体公司；电子分析天平，型号 FA-1204B，平轩科学仪器公司；高速相机，型号 FASTCAM Mini Ux50 type 160K-C-32G，Photron 公司；光源，型号 U-40S，丹尼优公司；超声波水浴，型号 WB-100-1，群安科学仪器公司；粒径测量显微镜，型号 STM7，OLYMPUS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验平台搭建

本实验基于液滴微流控技术，利用共轴聚焦型微通道制备 HNS-IV/F_{2602}PBX 炸药微球。搭建的 HNS-IV 微球制备平台主要由以下几个模块组成：液体驱动模块（包括注射泵和玻璃注射器）；液滴生成模块（由共轴聚焦型微通道和鲁尔接头组成）；液滴固化模块（包括烧杯）以及成像模块（由高速相机、微距摄像头和光源组成）。实验平台整体布局如图 1 所示。

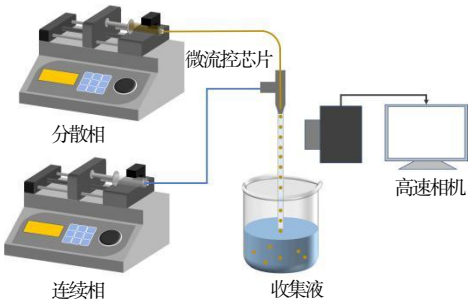


图 1 纳米 HNS 微球制备平台

Fig.1 Nano-HNS microsphere preparation platform

1.2.2 实验步骤

首先，准确称取质量分数为 0.25%的 F_{2602} 置于烧杯中，并加入 10 mL 乙酸乙酯（EA），随后将该混合物置于超声波水浴中，以确保 F_{2602} 在 EA 中充分溶解分散，持续时间 30 min。接着，准确称取一定质量的 HNS-IV，并使用配制好的 EA/F_{2602} 溶液在超声水浴中将其充分分散，形成固含量为 5%的 HNS-IV/EA 悬浮液，作为后续实验所需的分散相。同时，准备去离子水作为实验中的连续相和收集液。

实验开始时，先通过注射泵将连续相（去离子水）以稳定流速注入共轴聚焦型微通道中，待连续相流量稳定后，再开始以设定流速注入分散相。当分散相到达流体交汇处时，会受到连续相的剪切作用力，在微通道内逐渐形成稳定的 HNS 球形液滴。在此过程中，利用高速相机对液滴生成模式进行实时监测，保持 2 000 帧/s 的记录频率，通过统计帧数得到液滴生成的频率，并结合数值计算方法得到生成液滴的直径。液滴在流入收集液的过程中，伴随着 EA 的扩散作用，黏结剂逐渐析出。最终，随着 EA 的持续扩散，HNS 微球依靠自身分子间作用力以及黏结剂的作用逐渐固化形成 PBX 微球，固化过程如图 2 所示。最后，用 150 目筛网将 HNS 微球滤出，并用去离子水清洗后送入烘箱内，在 60 ℃下烘干 4 h。

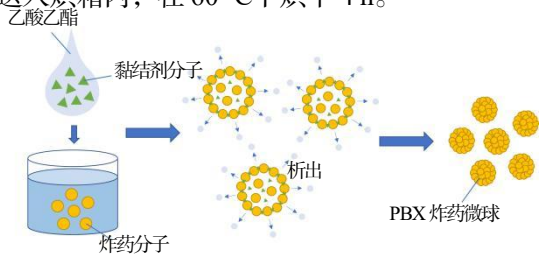


图 2　纳米 HNS 微球固化过程示意图

Fig.2　Schematic diagram of the curing process of nano HNS microspheres

1.2.3 数据处理

实验中，借助 PFV4 软件对高速相机所拍摄到的影像进行处理分析。通过统计帧数，观察并记录相邻两个液滴依次通过管路中同一特定位置的时间差，分别计算多组时间差数据后，取其平均值作为最终的时间差 Δt。液滴生成频率 f 的计算公式如式（1）所示：

$$f=\frac{1}{\Delta t} \qquad (1)$$

在得到液滴生成频率后，进一步计算球形液滴直径 D，计算公式如式（2）所示：

$$D=\sqrt[3]{\frac{6Q_d}{\pi f}} \qquad (2)$$

式（1）~（2）中：Δt 为时间差，ms；f 为液体生成频率，Hz；D 为液滴直径，μm；Q_d 为分散相流量，μL·min^{-1}。

2　实验结果与讨论

2.1　HNS 液滴生成模式

在微流控技术中，液滴的生成主要通过 4 种模式实现：挤压模式[22-23]、滴流模式[24]、射流模式以及不稳定射流模式[25]。不同模式下液滴的生成机制及主导作用力存在显著差异。在共轴通道内，连续相流体将分散相流体包裹其中，液滴的生成过程受到流体剪切力、表面张力以及粘性力的共同作用[26]。

为探究不同液滴生成模式对 HNS 微球粒径分布的影响，以 HNS/F_{2602}/EA 作为分散相（其中 HNS 固含量为 12.5%，F_{2602} 的质量为 HNS 质量的 0.25%），以去离子水作为连续相，用高速相机对两相交汇处的液滴生成过程进行实时监测。不同模式下的液滴生成过程如图 3 所示。

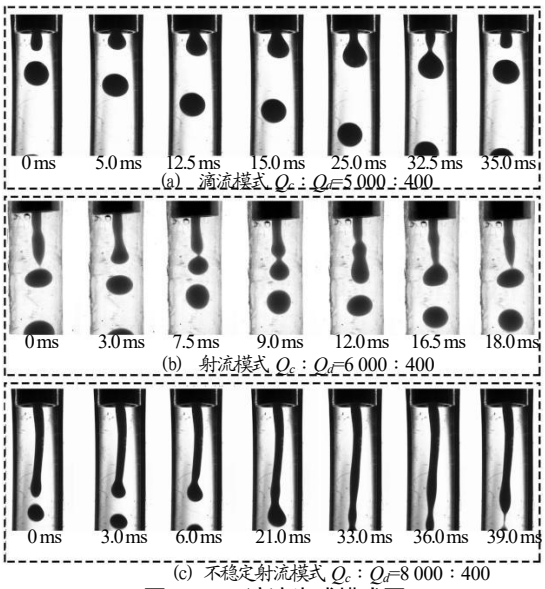


图 3　HNS 液滴生成模式图

Fig.3　HNS droplet generation mode diagram

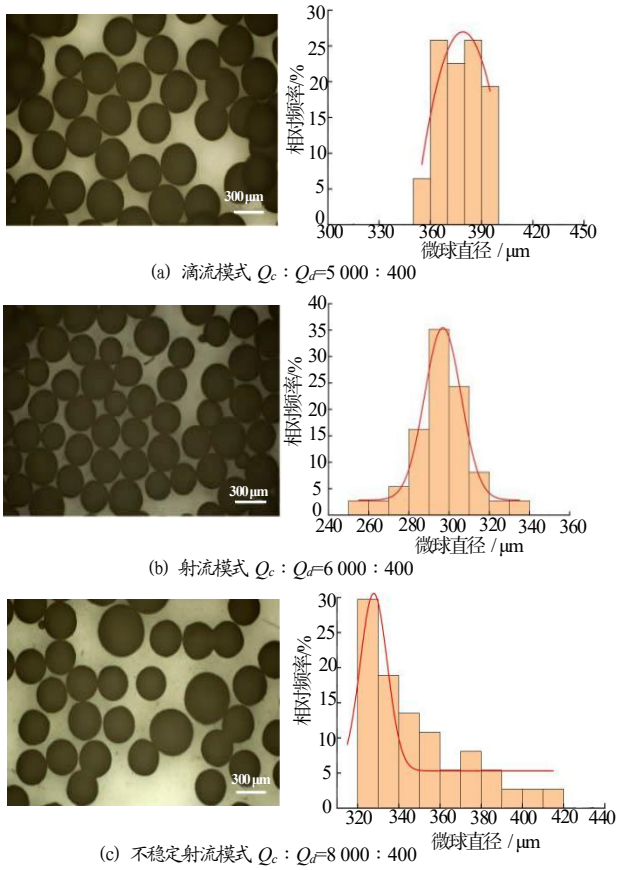
当流量比 Q_c：Q_d=5 000：400 时，液滴生成过程

如图 3（a）所示。以液滴刚好断裂的时刻作为时间起始点（t=0 ms），随着分散相的持续注入，分散相末端的尺寸逐渐增大，开始呈现出液滴的初步形态，并且随着时间的推移而不断增大。当 t=25 ms 时，受到连续相流体剪切力的作用，分散相末端开始沿着连续相的流动方向移动，并形成了颈部。到了 t=32.5 ms 时，在连续相的剪切力与界面张力的共同作用下，分散相末端的颈部逐渐收缩变细。最终在 t=35.0 ms 时，分散相末端的颈部完全断裂，形成了独立的液滴。此时，液滴生成模式为滴流模式，在这一过程中，多种作用力共同参与，其中流体剪切力和界面张力在液滴断裂过程中具有重要作用[26]。

当流量比提高到 Q_c∶Q_d=6 000∶400 时，液滴生成过程如图 3（b）所示。同样以液滴刚好断裂的时刻为时间起始点（t=0 ms），可以观察到随着连续相流量的增加，分散相流体下游被拉长。根据 Rayleigh–Plateau 不稳定性理论，射流尖端液滴的形成取决于来自外部连续相的剪切应力和界面张力之间的竞争[26]。在 t=3.0 ms 到 t=7.5 ms 的过程中，分散相末端出现颈缩现象。然而，由于连续相施加于分散相的剪切作用不足以使颈部断裂，在 t=7.5 ms 到 t=12.0 ms 过程中，颈部未发生断裂，分散相末端的液滴继续生长。随后在 t=16.5 ms 时，分散相末端再次出现颈缩过程，并在 t=18.0 ms 时液滴发生断裂。此时，液滴生成模式为射流模式，液滴断裂过程主要由毛细失稳现象主导[26]。

当流量比进一步提高到 Q_c∶Q_d=8 000∶400 时，液滴生成过程如图 3（c）所示。随着连续相流量的进一步增加，在 t=0 ms 时观察到分散相流体线被拉伸至更长的形态。这一现象归因于连续相流量的提升导致分散相流体的不稳定性加剧。在 t=21.0 ms 至 t=36.0 ms 的时间段内，射流下游多处位置出现颈缩现象，但液滴的断裂形成过程受到阻碍。最终，在 t=39.0 ms 时，在不稳定性、剪切力和界面张力的综合作用下，射流尖端发生断裂，生成液滴。

采用扫描隧道显微镜（STM7）对不同液滴生成模式下制备的微球进行成像，并借助其内置测距工具，对每种模式下产生的 40 个微球进行直径测量。在测距过程中，以微球的边缘为坐标原点进行归零校准，随后旋转 X 轴测距旋钮，直至坐标原点穿过微球球心并定位于对侧边缘，此时 X 轴坐标数据即为微球直径。所得直径数据经由 Origin 软件进行高斯分布拟合，其结果如图 4（a）~（c）所示。



(a) 滴流模式 Q_c∶Q_d=5 000∶400

(b) 射流模式 Q_c∶Q_d=6 000∶400

(c) 不稳定射流模式 Q_c∶Q_d=8 000∶400

图 4 不同液滴生成模式下 HNS 微球形貌及粒径分布图

Fig.4 Morphology and particle size distribution of HNS microspheres under different droplet generation modes

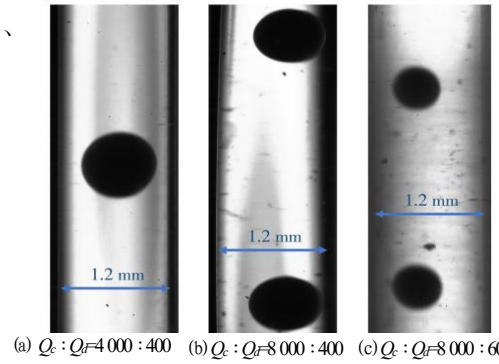
在滴流模式下，所制备的 HNS 微球表现出较高的均一性和良好的球形度，其粒径分布范围介于 351~399 μm 之间，微球直径的标准偏差为 12.3。射流模式下，HNS 微球均一度较高，球形度好，粒径分布在 254~334 μm，标准偏差为 15.1。而在不稳定射流模式下，HNS 微球的球形度依然较好，粒径分布范围 321~415 μm，标准偏差为 24.7。相较于不稳定射流，滴流和射流模式下微球粒径的标准偏差更小，表明不稳定射流模式下 HNS 微球的粒径分布更为分散。

实验结果表明，液滴生成模式对微球制备粒径分布具有决定性影响。在滴流模式下，液滴生成过程表现出较高的稳定性，从而使得微球粒径分布较为集中。然而，随着连续相流量的提升，液滴生成模式由滴流

模式转变为射流模式。在射流模式中，液滴生成过程受到 Rayleigh-Plateau 不稳定性的影响，导致在高流量下伴随着流体的不稳定性加剧，液滴断裂周期的随机性增加，进而引起液滴尺寸的不一致性，最终使得微球粒径分布范围扩大。

2.2　两相流量对液滴生成的影响

为深入研究两相流量对液滴生成的影响，本研究选取 HNS/F_{2602}/EA 作为分散相（其中 HNS 固含量为 5%，F_{2602} 质量为 HNS 质量的 0.25%），并以去离子水作为连续相。通过高速相机记录生成液滴的过程，结果如图 5 所示。



(a) $Q_c:Q_d$=4 000 : 400　(b) $Q_c:Q_d$=8 000 : 400　(c) $Q_c:Q_d$=8 000 : 600

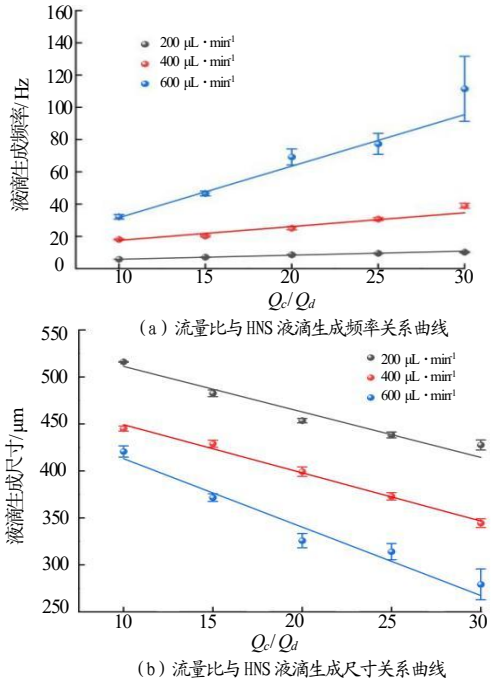
图 5　不同流量下 HNS 液滴生成图

Fig.5　HNS droplet generation diagram at different flow rates

从图 5（a）~（b）可以发现，在同一帧内记录到的液滴数量从 1 个增加到 2 个，且液滴尺寸有所减小，表明连续相流量的改变会同时影响液滴生成的频率和尺寸。进一步观察图 5（b）和图 5（c），在同一帧内记录到的液滴尺寸减小，说明在连续相流量不变的情况下，分散相流量的增加会对生成液滴的直径产生显著影响。

不同分散相流量下流量比对液滴生成频率和生成尺寸的影响规律如图 6 所示。

研究发现，在分散相流量为 200 μL・min^{-1} 时，随着流量比的提高，液滴生成频率由 5.8 Hz 提高至 10.1 Hz，而液滴尺寸则由 515.8 μm 减小至 428.4 μm；当分散相流量为 600 μL・min^{-1} 时，液滴的生成频率由 31.0 Hz 提升至 116.3 Hz，液滴尺寸从 425.4 μm 缩小至 273.8 μm。由此可以得出结论，提高流量比可促进 HNS 液滴生成频率的增加，并减小液滴的生成尺寸。对图 6 中的数据进行线性拟合分析，结果显示，当分散相流量从 200 μL・min^{-1} 提升至 600 μL・min^{-1} 时，液滴生成频率的拟合线斜率由 0.25 增至 3.25，液滴生成尺寸的拟合线相对斜率由 5.34 增至 6.87。这表明，随着分散相流量的提升，流量比对液滴生成尺寸和频率的影响亦随之增强。其原因在于流量比的提升导致分散相所受连续相的剪切力增大，使得分散相更容易被剪切成更小的液滴，进而液滴的生成频率得以提升。当分散相流量从 200 μL・min^{-1} 增至 600 μL・min^{-1} 时，分散相流量放大 3 倍，因此分散相所受剪切力显著增强，HNS 液滴也能被剪切成更小的液滴。综合图 6（a）~（b）可以发现，误差棒的长度随着流量的增加而增长，表明液滴生成尺寸及频率存在较大的波动。



（a）流量比与 HNS 液滴生成频率关系曲线

（b）流量比与 HNS 液滴生成尺寸关系曲线

图 6　流量比对 HNS 液滴生成频率和尺寸的影响

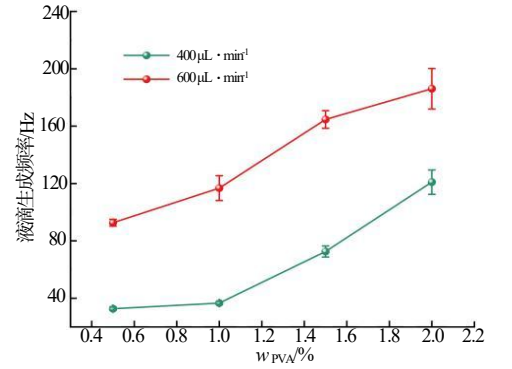
Fig.6　Effect of flow ratio on the frequency and size of HNS droplet generation

2.3　流体物性对液滴生成的影响

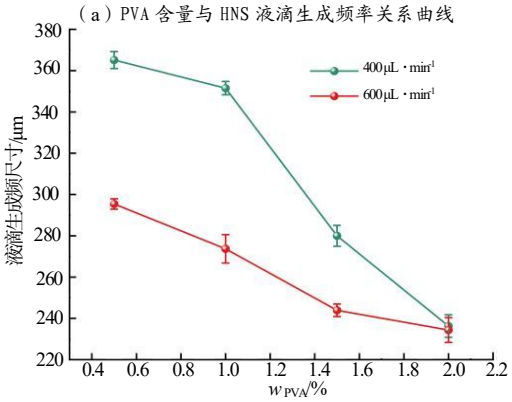
2.3.1　连续相 PVA 含量

为了研究连续相粘度对 HNS 液滴生成的影响，通过调节连续相中 PVA 的含量来调控连续相粘度。实验中固定分散相为 HNS/F_{2602}/EA，其中 HNS 的质量分数为 5%，氟橡胶 F_{2602} 的含量为 HNS 质量的 0.25%；连续相分别为质量分数为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2%的 PVA 水溶液，且固定流量比为 1∶20。采用

不同连续相体系进行实验，利用高速相机拍摄两相交汇处的液滴生成过程，结果如图 7 所示。



（a）PVA 含量与 HNS 液滴生成频率关系曲线



（b）PVA 含量与 HNS 液滴生成尺寸关系曲线

图 7 PVA 含量对 HNS 液滴生成频率和尺寸的影响

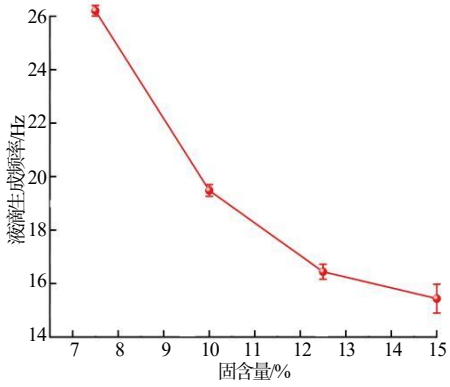
Fig.7 Effect of PVA content on the frequency and size of HNS droplet generation

由图 7（a）可见，当分散相流量为 400 μL·min^{-1} 时，随着连续相 PVA 含量从 0.5%增加至 2.0%时，液滴生成频率从 31.9 Hz 提高至 123.4 Hz。这是由于 PVA 含量的增加导致连续相粘度增大，导致分散相受到的流体剪切力增强，分散相的颈部更容易被连续相成功剪切，从而逐渐提高了液滴的生成频率。进一步地，当 PVA 含量为 2%时，随着分散相流量从 400 μL·min^{-1} 增加至 600 μL·min^{-1}，液滴生成频率从 123.4 Hz 提高至 188.7 Hz。这是由于在相同的流量比下，分散相和连续相的流量同比例增加，整体流量增大，导致分散相受到的连续相的剪切力作用进一步增强，进而提高了液滴的生成频率。

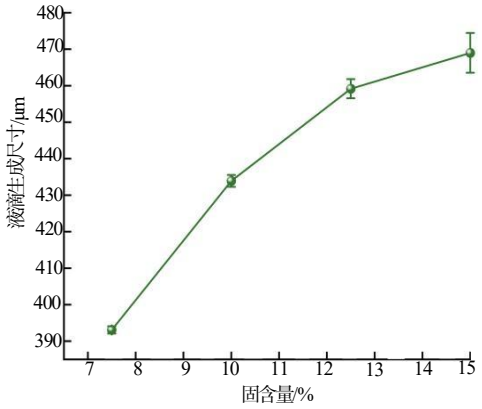
连续相粘度的变化会影响流体的剪切力，从而直接改变液滴的生成参数。由图 7（b）可见，当分散相流量为 400 μL·min^{-1} 时，随着连续相 PVA 含量从 0.5%增加至 2.0%，液滴尺寸从 367.9 μm 减小至 234.8 μm。这表明随着 PVA 含量的增加和连续相粘度的提高，分散相受到的流体剪切力增大，生成的液滴尺寸逐渐减小。此外，当 PVA 含量为 1.0%时，随着分散相流量从 400 μL·min^{-1} 增加至 600 μL·min^{-1}，生成液滴的直径从 352.0 μm 减小至 272.8 μm。这说明在流量比不变的条件下，随着分散相流量的增加，连续相的剪切作用增强，导致液滴尺寸逐渐减小。

2.3.2 分散相物性

为了研究分散相物性对 HNS 液滴生成的影响，通过改变分散相中 HNS 的含量来调整分散相的固含量。实验准备了 HNS 质量分数分别为 7.5%、10%、12.5%和 15%的 HNS/F_{2602}/EA 悬浮液，选用去离子水为连续相，并固定分散相与连续相流量比为 400∶5 000。通过高速相机拍摄两相交汇处的液滴生成过程，进行了不同分散相固含量下的 HNS 液滴制备实验。实验结果如图 8 所示。



（a）固含量对 HNS 液滴生成频率的影响（Q_c∶Q_d=5 000∶400）



（b）固含量对 HNS 液滴生成尺寸的影响（Q_c∶Q_d=5 000∶400）

图 8 固含量对 HNS 液滴生成频率和尺寸的影响

Fig.8 Effect of solid content on the frequency and size of HNS droplet generation

由图 8(a)可见，随着固含量从 7.5%提高至 15%，液滴生成频率从 26.2 Hz 降至 15.4 Hz。同时，由图 8（b）可见，固含量的提高也影响着 HNS 液滴的生成

尺寸，液滴生成尺寸从 393.5 μm 增大至 469.0 μm。因此可知，随着分散相中固体颗粒浓度的增加，分散相流体体系的粘度增大，导致连续相流体对分散相流体的剪切力减弱。因此，在相同的流量条件下，随着固含量的增加，液滴生成尺寸增大，而生成频率降低。

3 结论

本研究将共轴聚焦流液滴微流控技术与高速相机在线监测技术相结合，对 HNS 液滴生成过程进行了细致的观察。系统地分析了液滴生成模式、两相流量及流体物性等因素对 HNS 液滴生成过程的作用规律，实现了微球粒径在 233.0 μm 至 515.8 μm、生成频率在 5.8 Hz 至 188.7 Hz 范围内的可控调节，为含能微球的精准制备提供了关键的实验依据与理论支撑。

（1）在液滴生成模式方面，滴流模式和射流模式下生成的 HNS 微球粒径分布集中、均一度高，有利于制备粒径分布均匀的微球；而不稳定射流模式则导致微球粒径分布宽泛、均一度差。

（2）在两相流量的影响研究中，发现液滴生成频率与流量比呈正相关，即流量比增加时液滴生成频率随之提高；而液滴生成尺寸与流量比呈负相关，流量比增大时液滴尺寸相应减小。此外，分散相流量的提升会进一步增强流量比对液滴生成的影响效果。

（3）流体物性对液滴生成同样具有重要影响。连续相中聚乙烯醇（PVA）含量的增加会提升液滴生成频率，同时减小液滴生成尺寸，这主要归因于连续相粘度的增加强化了对分散相的剪切力。对于分散相而言，其固含量的上升会导致液滴生成频率降低以及液滴生成尺寸增大，这是由于分散相粘度的增加削弱了连续相对分散相的剪切作用。

综上所述，本研究不仅系统地揭示了微流体特性对纳米 HNS 液滴生成的内在机制，还为通过精确调控微流体特性实现含能微球的粒径定制化制备提供了科学依据和技术手段，对于推动含能材料领域的技术进步具有重要意义。

参考文献：

[1] Rieckmann T, Völker S, Lichtblau L, et al. Investigation on the thermal stability of hexanitrostilbene by thermal analysis and multivariate regression [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(4): 1 327-1 335.

[2] Pouretedal H R, Damiri S, Karami Z. Increasing of photostability of HNS explosive in the presence of UV photo-stabilizers [J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 338- 342.

[3] 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: 128 613.

[4] 石晓峰, 王晶禹, 李小东. HNS 的球形化工艺控制研究[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2014,35(1):54-57.

[5] Huo H, Ye B, Shi Y, et al. Preparation of HNS microspheres by rapid membrane emulsification [J]. Particuology, 2023, 79: 35-44.

[6] Han R, Chen J, Zhang F, et al. Fabrication of microspherical Hexanitrostilbene (HNS) with droplet microfluidic technology [J]. Powder Technology, 2021, 379: 184-190.

[7] 刘意, 朱瑞, 周近强, 等. 液滴微流控技术制备窄粒径分布的 HNS 基 PBX 复合微球[J].火工品, 2023(1):53-57.

[8] Yan F, Zhu P, Zhao S, et al. Microfluidic strategy for coating and modification of polymer-bonded nano-HNS explosives [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 131 096.

[9] Zhao Y, Cheng Y, Shang L, et al. Microfluidic synthesis of barcode particles for multiplex assays [J]. Small, 2015, 11(2): 151-174.

[10] Amstad E, Gopinadhan M, Holtze C, et al. Production of amorphous nanoparticles by supersonic spray-drying with a microfluidic nebulator [J]. Science, 2015, 349(6 251): 956-960.

[11] Niu G, Ruditskiy A, Vara M, et al. Toward continuous and scalable production of colloidal nanocrystals by switching from batch to droplet reactors [J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(16): 5 806-5 820.

[12] An B W, Kim K, Kim M, et al. Direct printing of reduced graphene oxide on planar or highly curved surfaces with high resolutions using electrohydrodynamics [J]. Small, 2015, 11(19): 2 263-2 268.

[13] Lee M W, An S, Kim N Y, et al. Effects of pulsing frequency on characteristics of electrohydrodynamic inkjet using micro-Al and nano-Ag particles [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 46: 103-110.

[14] Cong C, Li X, Xiao W, et al. Electrohydrodynamic printing for demanding devices: A review of processing and applications [J]. Nanotechnology Reviews, 2022, 11(1): 3 305-3 334.

[15] Ekanem E E, Zhang Z, Vladisavljević G T. Facile microfluidic production of composite polymer core-shell microcapsules and crescent-shaped microparticles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 498: 387-394.

[16] Liu E Y, Choi Y, Yi H, et al. Triple emulsion-based rapid microfluidic production of core–shell hydrogel microspheres for programmable biomolecular conjugation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(10): 11 579-11 587.

[17] 李少群, 张方, 王燕兰, 等. 射流不稳定性对流动聚焦法制备硝化棉微球的影响[J].火工品,2023(1):46-52.

[18] 刘意, 朱瑞, 时嘉辉, 等. 液滴微流控技术制备亚微米级 HNS 基 PBX 复合微球[J].含能材料,2023,31(2):121-129.

[19] Liu Y, Guo Y, Li J, et al. Controllable preparation of hexanitrostilbene (HNS) microspheres with multi-cavity structure to enhance safety and combustion performance [J]. Powder Technology, 2025, 449: 120 397.

[20] Liu Y, Guo Y, Liu S, et al. Preparation of flame-retardant HNS/DAAF energetic composite microspheres using droplet microfluidic technology [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107 788.

[21] Wu B dong, Liu Y, Yang J hui, et al. Preparing HNS/n-Al heat-resistant microspheres with enhanced combustion performance using droplet microfluidic technology [J]. Energetic Materials Frontiers, 2024, 5(2): 81-89.

[22] Abate A R, Mary P, Van Steijn V, et al. Experimental validation of plugging during drop formation in a T-junction [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(8): 1 516.

[23] Sivasamy J, Wong T N, Nguyen N T, et al. An investigation on the mechanism of droplet formation in a microfluidic T-junction [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2011, 11(1): 1-10.

[24] Agarwal V G, Singh R, Bahga S S, et al. Dynamics of droplet formation and flow regime transition in a T-shaped microfluidic device with a shear-thinning continuous phase [J]. Physical Review Fluids, 2020, 5(4): 044 203.

[25] Romero P A, Abate A R. Flow focusing geometry generates droplets through a plug and squeeze mechanism [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(24): 5 130.

[26] Nunes J K, Tsai S S H, Wan J, et al. Dripping and jetting in microfluidic multiphase flows applied to particle and fibre synthesis [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(11): 114 002.