

文章编号: 1003-1480 (2023) 01-0046-07

射流不稳定性对流动聚焦法制备硝化棉微球的影响

李少群, 张方, 王燕兰, 张松, 韩瑞山, 卢飞朋

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安, 710061)

摘要: 为通过微流控技术获得良好形貌特性的硝化棉微球, 以硝化棉的乙酸乙酯溶液为研究对象, 探究了流动聚焦微流控芯片中硝化棉/乙酸乙酯水包油液滴的生成机制, 详细研究了在滴流、稳定射流、不稳定射流3种流动模式下, 连续相、分散相流量以及界面张力等对微液滴生成的影响, 并在3种流动模式下制备硝化棉微球。结果表明: 滴流和稳定射流模式下制备的微球呈单分散、高度球形化、窄粒径分布特性; 不稳定射流模式下制备的微球高度球形化, 粒径分布较滴流和稳定射流下的宽。

关键词: 硝化棉微球; 流动聚焦; 微流控; 射流不稳定

中图分类号: TJ55; TQ562+.21 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.010

Effect of Jet Instability on the Preparation of Nitrocellulose Microspheres by Flow Focusing

LI Shao-qun, ZHANG Fang, WANG Yan-lan, ZHANG Song, HAN Rui-shan, LU Fei-peng

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: To obtain nitrocellulose microspheres with good morphology features by microfluidic technology, taking the ethyl acetate solution of nitrocellulose as the research object, the formation mechanism of nitrocellulose / ethyl acetate water-in-oil droplets in flow focusing microfluidic chip was investigated. The effects of continuous phase flow, dispersion phase flow and interfacial tension on the formation of microdroplets were studied in detail under three flow regimes, including dripping flow, stable jetting, unstable jetting. And nitrocellulose microspheres were prepared by the three flow regimes. The results show that the microspheres prepared by dripping flow and stable jetting modes have characteristics of monodisperse, highly spheroidal and narrow particle size distribution, while the microspheres prepared by unstable jetting regime are highly spherical and the particle size distribution is wider than that in dripping flow and stable jetting regime.

Key words: Nitrocellulose microsphere; Flow focus; Microfluidic; Jetting instability

含能材料的颗粒形貌和尺寸直接影响其在火工品技术应用中的流散性、安全性、热稳定性和输出性能, 而对含能材料进行球形化处理可优化其形貌特性, 进而提升其安全性和装药性能。目前含能材料球形化方法主要有微乳法^[1]、机械研磨^[2]、喷雾干燥^[3]等, 这些方法大多基于传统间歇式反应釜, 存在成本

高、污染、危险、性能一致性不好等缺陷^[4]。微流控技术是使用微通道处理或操纵微小流体的技术^[5], 液滴微流控^[6]是在微通道内将流体离散成微小液滴^[7], 常用的通道结构有T型^[8]、流动聚焦型^[9]和共聚焦型^[10]。液滴微流控操作简单, 制备的微球大小均匀、单分散性好, 并且精确可控、试剂消耗量低、实验安全

收稿日期: 2022-10-13

作者简介: 李少群(1995-), 女, 在读硕士研究生, 从事微纳结构含能药剂研究。

通讯作者: 张方(1974-), 女, 研究员, 从事微纳结构含能药剂与微流控制备技术研究。

系数高,是含能材料球形化制备的新方法。ICT研究所^[1]使用微流控技术实现了球形二硝酰胺铵盐颗粒的连续生产。史雨^[12]、刘换敏^[13]分别用T型微通道芯片制备出CL-20微球、球形发射药。Han R^[14]采用硝化棉作为粘结剂,使用聚焦型微流控芯片制备了HNS微球。成雅芝^[15]以聚偏二氟乙烯(PVDF)作为粘结剂,采用微流控技术制备了nAl@PVDF和nAl@PVDF@CL-20复合微颗粒。周近强^[16]以氟橡胶(F2602)为粘结剂制备TATB基PBX复合微球。

液滴微流控技术制备球形含能材料的关键是液滴和射流的形成。滴流和射流动力学受两相流体流量、流体粘度、界面张力、表面化学性质和微通道结构等参数的影响^[17-20]。本文以硝化棉的乙酸乙酯溶液作为研究对象,探究了在滴流、稳定射流、不稳定射流3种流动模式^[21]下界面张力和两相流量对微液滴生成的影响,并在3种流动模式下制备硝化棉微球,通过对微球进行表征分析,探究流动模式对硝化棉微球形貌的影响。

1 实验部分

1.1 试剂材料与仪器

试剂材料:乙酸乙酯,无水乙醇,丙酮,分析纯,成都市科隆化学品有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),化学纯,天津市河东区红岩试剂厂;硝化棉,自制;去离子水。

仪器:电子天平,AL104,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;恒温磁力搅拌器,90-2,常州国华电器有限公司;倒置电子光学显微镜,XSP-19CP,上海沪杏光学仪器有限公司;高速摄像机,FASTCAM Mini WX,活图隆(上海)商贸有限公司;气动泵,U-FEZ-2000pck,法国Fluigent公司;流量传感器,FLU-XLPCK,法国Fluigent公司;扫描电子显微镜,VEGA TSS136XM,捷克TESCAN公司;纯水机,LAB DAY-20,湖南科尔顿水务有限公司。

1.2 实验装置

制备硝化棉微球的微流控系统如图1(a)所示,

主要由储液池、气动泵、流动聚焦型微流控芯片、倒置显微镜、流量计、收集烧杯等组成,采用精密微量气动泵来驱动两相溶液。图像采集系统由光源、显微镜镜头和高速摄影相机3个部分组成。分散相和连续相通过气动泵泵入流动聚焦型微流控芯片,制备单分散的水包油液滴,生成的液滴从通道流出进入收集系统收集,经过洗涤、固化、干燥后获得硝化棉微球。

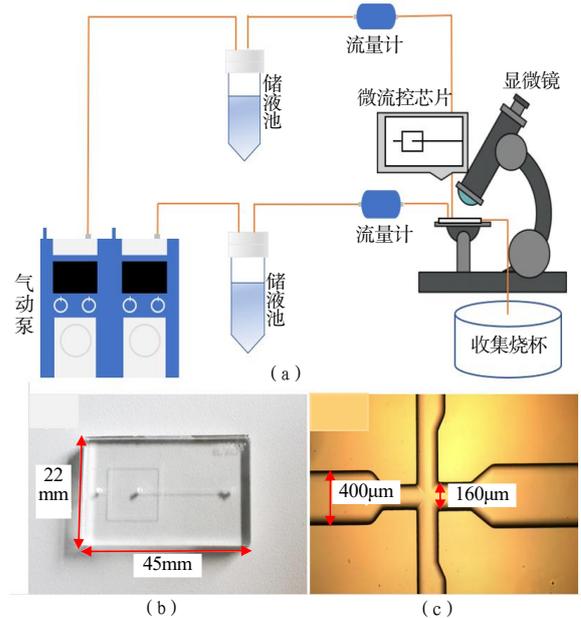


图1 微流控系统装置及流动聚焦型微流控芯片示意图
Fig.1 Schematic diagram of microfluidic system device and flow focusing chip

流动聚焦型微流控芯片为玻璃材质,如图1(b)所示,芯片液滴形成位置宽度为 $160\ \mu\text{m}$,深度为 $70\ \mu\text{m}$,出口通道宽度为 $400\ \mu\text{m}$,以避免液滴和通道壁之间的直接接触,如图1(c)所示。

1.3 实验过程

分散相配置为硝化棉含量分别为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的乙酸乙酯溶液,既将硝化棉添加到乙酸乙酯中并磁力搅拌1h直至完全溶解。连续相配置为SDS含量分别为0、0.5%、1.0%、2.0%、4.0%的水溶液,既将SDS溶解到去离子水中,磁力搅拌直至完全溶解。所有溶液都是在流动聚焦之前现配现用。设置分散相流速 Q_d 为 $1\sim 100\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,连续相流速 Q_c 为 $15\sim 1200\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,通过气动泵控制流量。将微流控芯片连接到气动泵,用大量去离子水收集生成的

液滴，洗涤，静置，去除上层溶液。重复几次以上操作，干燥后得到硝化棉微球。

2 实验结果与讨论

2.1 流体对微液滴生成过程的影响分析

两相流体在流动聚焦微流控芯片中的流动是表面张力起重要作用的毛细流动，其优势是制备的产物不仅在固定体积下拥有最小比表面积，而且具有绝对的可重复性。在流动聚焦微流控芯片中，液滴形成如图2所示，主要分为水动力聚焦、液滴生长、液滴脱离^[22]3个阶段。图2中分散相从中间微流道中流入芯片，连续相从两侧流道进入芯片，3路液体在交叉处汇合，经小孔聚焦，分散相在连续相的夹流聚焦作用下形成稳定的锥形^[23]；在锥的顶端产生一股微射流穿过小孔，分散相液滴头部前端生长，界面缩小形成球形，因 Rayleigh 不稳定性^[24-25]破碎成单分散的液滴。

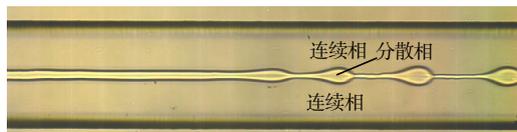


图2 微液滴生成过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of droplet generation

微液滴生成过程是由分散相流体和连续相流体的界面张力、粘性力、惯性力的受力平衡所决定的^[26]。影响分散过程的主要作用力是连续相对分散相的剪切力以及两相液液界面张力，而影响连续相剪切力的主要因素包括连续相流体的流量和粘度^[27]。在这些力的作用下，分散相通常会出现3种流型：滴流、稳定射流和不稳定射流，既：（1）当分散相液柱在连续相流体的对称剪切力作用下被夹断时，分散相液柱头部前端生长，界面缩小形成球形，发生破裂，在主通道中形成分散的液滴，既形成滴流；（2）当连续相流体的剪切作用和挤压作用不足以夹断分散相流体的液柱时，分散相以射流形式存在，射流液柱长度可能大于整个通道长度，在连续相扰动加剧下射流锥形尖端断裂破碎成液滴，可分为稳定射流及不稳定射流。

硝化棉/乙酸乙酯/水/SDS 体系中分散相的3种典型流型如图3所示。由图3可见，滴流和稳定射流流型下，液滴是一滴紧接着上一滴断裂生成，生成的液

滴呈透明的球形且一致性高；不稳定射流流型在微通道内断裂后喷射，形成一连串液滴，在微通道内观察到大小不一、呈椭圆形的透明液滴。

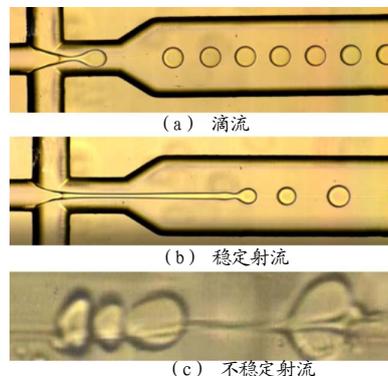


图3 3种流型的分散相

Fig.3 Dispersion phase of three flow regimes

流型图是研究两相流体流动行为的重要工具，是综合表示各种流型间过渡关系的简便方法，不同流型间的过渡可表明力平衡关系的变化。根据实验数据，绘制 0.5%硝化棉/乙酸乙酯/水/0.5%SDS 体系下流动聚焦型微通道中分散相和连续相两相流的流型图，如图4所示。

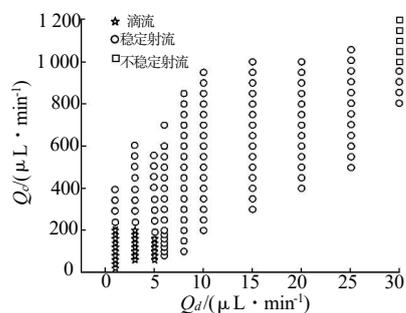


图4 不同流速下的流型图

Fig.4 Scheme of various flow patterns with different flow rates

由图4可以看出：在实验参数范围内，滴流和稳定射流是形成均一微滴的主要模式。滴流模式主要出现在 $15 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_c \leq 200 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_d \leq 5 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的范围内。当 $Q_d < 5 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，调控 Q_c ，连续相从分散相两侧流出，对分散相产生聚焦的效果，其作用力不断增加，使得分散相受到两侧连续相的对称剪切力作用，在交叉缩口处发生断裂，生成微液滴，这时分散相的断裂主要受到剪切力控制。稳定射流模式主要出现在 $100 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \leq Q_c \leq 1000 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $5 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_d \leq 25 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的范围内，在该范围内分散相流体经两侧连续相流体聚焦后形成稳定的射流液柱，连续相对分散相的扰动越来

越显著,由于 Rayleigh-Plateau 不稳定性液柱破碎成单分散的微液滴,生成的液滴直径远小于微通道尺寸。当 Q_c 和 Q_d 继续增加,既 $1000 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_c < 1200 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $Q_d > 25 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,射流从稳定向不稳定转变。

2.2 流量对液滴生成的影响

针对 0.5%硝化棉/乙酸乙酯/水体系,固定 Q_d 为 $1 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,研究不同 Q_c ($15 \sim 100 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) 时液滴的生成过程,结果如图 5 所示。由图 5 (a) 可见, Q_c 达到 $20 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 可形成滴流。

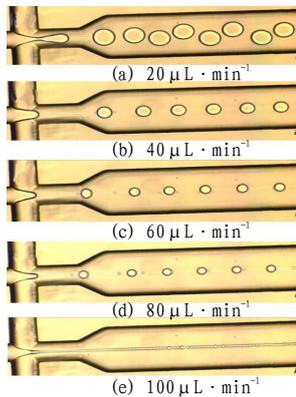


图 5 不同 Q_c 时液滴生成过程

Fig.5 Microsphere formation process for different Q_c .

测量生成的液滴直径,得出 Q_c 对液滴平均粒径的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可见,随着 Q_c 增大,生成液滴的平均粒径减小。

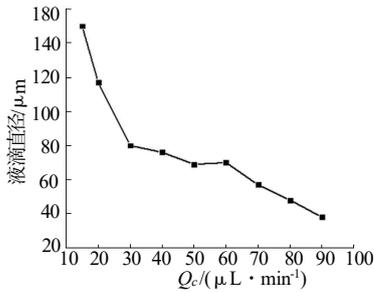


图 6 Q_c 对液滴平均粒径的影响

Fig.6 Effect of Q_c on the mean particle sizes of droplets

固定 Q_c 为 $40 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,调整 Q_d 为 $1 \sim 6 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,研究不同 Q_d 时液滴的生成过程,结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着 Q_d 增大,液滴生成频率增大,当 Q_d 为 $6 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,分散相不能被连续相在缩口处切断。

设定 Q_d 为 $6 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,调整 Q_c 为 $70 \sim 160 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,在显微镜下观察液滴生成过程,结果如图 8 所示。由图 8 可见,提高 Q_c 至 $70 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时可以

观察到液柱形成的射流被离散成液滴。不同 Q_c 下射流液柱断裂在同一位置,随着 Q_c 的增大,液滴的直径逐渐变小,且减小趋势变缓。

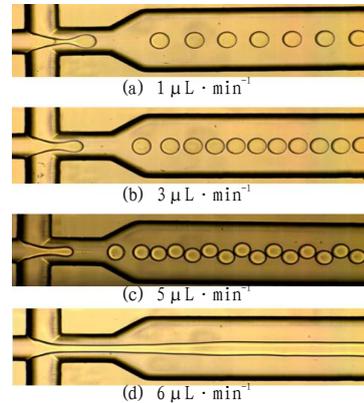


图 7 不同 Q_d 时液滴生成过程 ($Q_c=40 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
Fig.7 Droplet formation process for different Q_d ($Q_c=40 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)

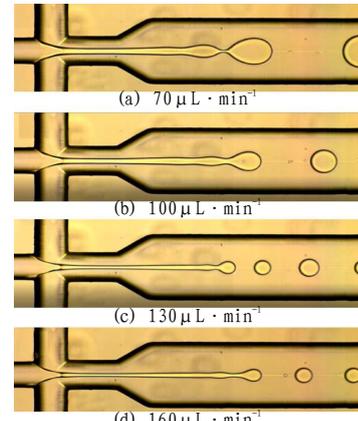


图 8 不同 Q_c 下液滴生成过程 ($Q_d=6 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
Fig.8 Microsphere formation process for different Q_c ($Q_d=6 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)

2.3 界面张力对液滴生成的影响

针对 1%硝化棉/乙酸乙酯/水/SDS 体系,测量在连续相中添加不同含量 SDS (0、0.5%、1%、2%、4%) 后的液液两相界面张力,研究界面张力对液滴生成的影响,结果如图 9 所示。由图 9 可见,当 SDS 含量为 0.5% 时,两相界面张力最大。

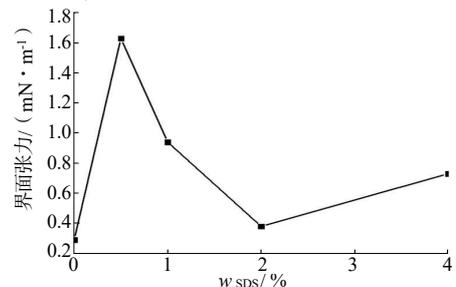


图 9 界面张力与 SDS 含量的关系

Fig.9 Relationship between interfacial tension and SDS content in droplet flow ($Q_c=80 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_d=2 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)

下逐渐添加连续相中的表面活性剂 SDS, 在显微镜下观察液滴生成情况, 结果如图 10 所示。

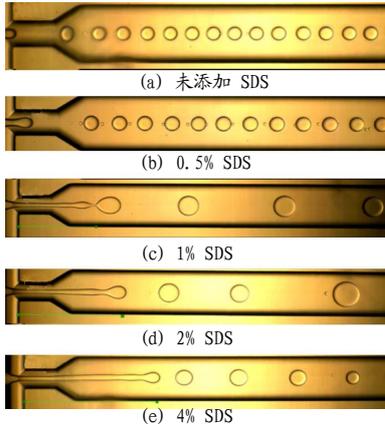


图 10 滴流流型不同含量 SDS 的液滴生成过程
Fig.10 Droplet formation process for different SDS content under dripping flow

由图 10 可以看出, 随着表面活性剂含量增加, 液滴直径逐渐增大。SDS 浓度为 0~1% 时, 流型表现为滴流, 其中, 未添加 SDS 时, 液滴直径为 $40\ \mu\text{m}$, SDS 含量为 1% 时, 液滴直径为 $50\ \mu\text{m}$ 。SDS 含量为 1%~4% 时, 流型向射流转变, 随着表面活性剂浓度的增加, 从缩口到液柱断裂位置的长度分别为 0.33, 0.43, 0.55 mm。

在稳定射流流型下 ($Q_c=300\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_d=6\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) 添加不同含量 SDS, 液滴的生成过程如图 11 所示。

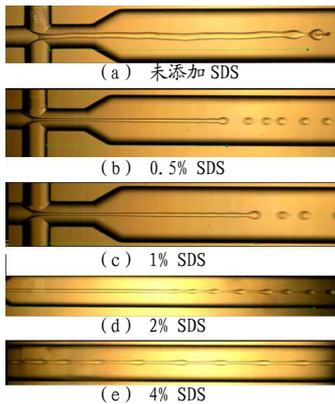


图 11 稳定射流流型下不同含量 SDS 的液滴生成过程
Fig.11 Droplet formation process for different SDS content under stable jetting

由图 11 测量出表面活性剂浓度为 0、0.5%、1%、2% 时相应的液柱长度依次为 0.82, 0.61, 0.62, 1.74 mm, 当 SDS 浓度为 4% 时, 观察区的液柱没有发生断裂。SDS 浓度为 0.5% 时, 缩口到液柱断裂位置的长度最短。根据图 9 可知, 当 SDS 含量为 0.5% 时,

两相界面张力最大, 两相液液界面张力的增大, 降低了射流表面不稳定波的增长率, 从而缩短了射流液柱断裂长度^[28]。

2.4 3 种不同流型条件下硝化棉微球的制备

针对 1% 硝化棉/乙酸乙酯/水/0.5% SDS 体系, 在滴流 ($Q_c=40\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_d=1\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)、稳定射流 ($Q_c=250\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_d=5\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)、不稳定射流 ($Q_c=1\ 200\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_d=40\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) 3 种流型条件下, 进行硝化棉液滴及微球的制备, 结果如图 12 所示。由图 12 可见, 滴流和稳定射流流型下制备的液滴呈透明的球形, 且一致性高; 不稳定射流流型下制备的透明液滴大小不一、尺寸差异大。

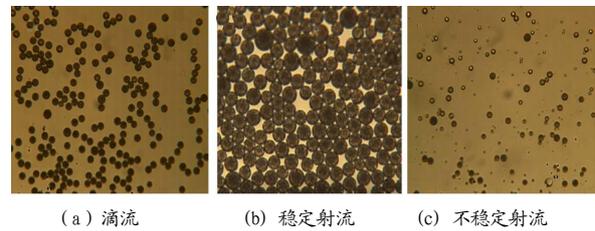


图 12 3 种流型下制备的液滴显微镜图

Fig.12 Microscopy images of droplet prepared by three flow regimes

对液滴固化后收集到的硝化棉微球进行形貌表征和粒度分布分析, 结果如图 13 所示。

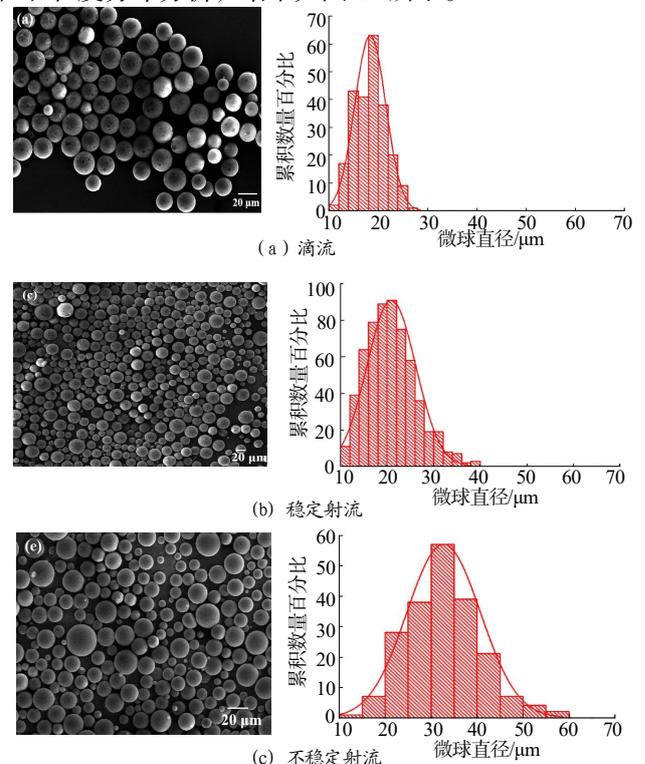


图 13 3 种流型下制备的硝化棉微球的表征
Fig.13 Characterization of nitrocellulose microspheres prepared by three flow regimes

由图 13 可以看出,滴流获得的硝化棉微球球形度好、单分散性好,粒径分布在 10~30 μm ,最小直径为 10 μm ,最大直径为 26 μm ,SPAN 值等于 0.46。稳定射流模式下制备的硝化棉微球球形度较好、单分散好,微球最小直径为 8 μm ,最大直径为 21 μm ,SPAN 值等于 0.35。不稳定射流模式下制备的微球形度好,但微球大小不均,粒径分布在 15~65 μm ,粒径最小直径为 15 μm ,最大直径为 64 μm ,SPAN 等于 0.57。

分析认为,滴流模式下形成的液滴一致性高,但是流量低且流量调控范围窄,制备微球生产效率低。稳定射流模式下可以制备出粒径均一的微球,射流的流速较快,生成液滴的效率较高,在一定范围内提高了生产效率,并且射流生成的液滴尺寸远低于通道,可以避免通道堵塞。但射流由于不稳定性存在,易从稳定射流转变为不稳定射流,而不稳定射流生成的微球尺寸分布范围大,因此,流体操控规律的研究对制备出均一性良好的微球有着至关重要的影响。

3 结论

本文将流动聚焦技术应用于含能材料球形化制备,探究了含硝化棉的乙酸乙酯溶液和水溶液两相流型,分析了制备硝化棉液滴及微球的影响因素,得出以下结论:

(1) 含硝化棉的乙酸乙酯溶液和水溶液两相流型存在滴流、稳定射流、不稳定射流 3 种流型。对于 0.5%硝化棉/乙酸乙酯/水/0.5%SDS 体系,在本实验范围内,当 $15 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_c \leq 200 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_d \leq 5 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,滴流形成;当 $100 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \leq Q_c \leq 1000 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $5 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} < Q_d \leq 25 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时流动从滴流转变为稳定射流;当 $1000 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \leq Q_c \leq 1200 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $Q_d > 25 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时体系流型为不稳定射流。

(2) 滴流状态下,生成液滴的直径与 Q_c 呈反比;随着 Q_d 增大,液滴生成频率增大。稳定射流状态下,增大 Q_c ,液滴的直径逐渐变小,继续增大 Q_c ,液滴

直径减小趋势变缓。

(3) 在 1%硝化棉/乙酸乙酯/水/SDS 体系中,滴流状态下,增加连续相中表面活性剂含量,会导致流型向稳定射流转变。稳定射流状态下,连续相中添加 0.5%SDS 时,两相界面张力最大,液柱断裂长度最短。

(4) 滴流和稳定射流模式下可以有效调控微球的窄粒径分布,制备出形貌良好、一致性高的微球。相较于滴流,稳定射流可缓解通道堵塞,提高液体的流量,显著地提高生产效率。不稳定射流下液滴生成频率高,固化后的微球呈高度球形化,且尺寸分布大。

参考文献:

- [1] 张安杨,朱燕芳,鲁月文,等. 超声辅助乳液法制备超细化球形 CL-20/DNT 复合物及其性能研究[J]. 火炸药学报,2018,041(005):455-460.
- [2] 赵珊珊,宋小兰,王毅,等. 机械球磨法制备纳米 CL-20/HMX 共晶炸药及其表征[J]. 固体火箭技术,2018,041(004):479-482.
- [3] 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(01):54-57.
- [4] 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.
- [5] Whitesides G M. The origins and the future of microfluidics[J]. Nature, 2006, 442(7101): 368-373.
- [6] Wang J, Wang J, Han J. Fabrication of advanced particles and particle-based materials assisted by droplet-based microfluidics[J]. Small, 2011, 7(13): 1728-1754.
- [7] 肖志良,张博. 基于液滴技术的微流控芯片实验室[J]. 色谱, 2011, 29(10): 949-956.
- [8] Tan W, Takeuchi S. Monodisperse alginate hydrogel microbeads for cell encapsulation & dagger[J]. Advanced Materials, 2007, 19(18): 2696-2701.
- [9] Tumarkin E, Kumacheva E. Microfluidic generation of microgels from synthetic and natural polymers[J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(8): 2161-2168.
- [10] Utada A S, Chu L Y, Fernandez-Nieves A, et al. Dripping,

- jetting, drops, and wetting: the magic of microfluidics[J]. *MRS Bulletin*, 32(09):702-708.
- [11] Antes J, S Löbbecke. Continuous flow synthesis of DNDA57 in a capillary microreactor[C]//*Energetic Materials Sythesis, Characteriaztion, Pocessing: 43rd International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany: ICT,2012.*
- [12] 史雨,李兆乾,郭礼波,等. CL-20 空心微球的微流控制备及其表征[J].*西南科技大学学报*,2018,33(04):6-11.
- [13] 刘换敏,李兆乾,王彦君,等.微流控技术合成球形发射药及其表征[J].*含能材料*,2017,25(9):717-721.
- [14] Han R, Chen J, Zhang F, et al. Fabrication of microspherical hexanitrostilbene (HNS) with droplet microfluidic technology [J]. *Powder Technology*, 2021(379): 184-190.
- [15] 成雅芝,王前,任慧,等.微流控组装 nAl@PVDF@CL-20 复合含能微颗粒的制备与表征[J].*含能材料*,2022,30(4):341-348.
- [16] 周近强,罗凯,郭云雁,等.液滴微流控技术制备 TATB 基 PBX 复合微球[J].*含能材料*,2022,30(5):439-445.
- [17] Gañán-Calvo A M. Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(2): 285.
- [18] 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):114 002-114 020.
- [19] Peng L, Yang M, Guo S, et al. The effect of interfacial tension on droplet formation in flow-focusing microfluidic device[J]. *Biomedical Microdevices*, 2011, 13(3): 559-564.
- [20] Geczy R, Agnoletti M, Hansen M F, et al. Microfluidic approaches for the production of monodisperse, super paramagnetic microspheres in the low micrometer size range[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, (471): 286-293.
- [21] Da Ling S, Zhang J, Chen Z, et al. Generation of monodisperse micro-droplets within the stable narrowing jetting regime: effects of viscosity and interfacial tension[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2022, 26(7):1-14.
- [22] 骆广生,王凯,徐建鸿,等.微化工过程研究进展[J].*中国科学:化学*,2014(9):1404-1412.
- [23] 司廷,李广滨,尹协振.流动聚焦及射流不稳定性[J].*力学进展*,2017(47):178-226.
- [24] Rayleigh L. On the instability of jets[J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1978, 1(1): 4-13.
- [25] Reitz R D. Mechanism of atomization of a liquid jet[J]. *Physics of Fluids*, 1982, 25(10): 1730-1742.
- [26] 刘竞技.基于微流控的球形发射药制备技术研究[D].北京:北京化工大学,2020.
- [27] 陈九生,蒋稼欢.微流控液滴技术:微液滴生成与操控[J].*分析化学*,2012(8):1293-1300.
- [28] 吴兆伟,施浙杭,赵辉,等.表面张力变化对含气泡液体射流破裂的影响[J].*化工学报*,2021,72(3):1283-1294.