

危险化学物质的微流控合成与制备技术

沈瑞琪¹, 朱朋¹, 叶迎华¹, 夏焕明², 赵双飞¹, 陈聪¹, 杨用¹

1. 南京理工大学化工学院, 南京 210094

2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094

摘要 含能化合物属于一类易燃易爆的危险化学物质, 极易受到机械、热和静电等刺激而发生爆炸。传统的含能化合物合成、分离、提纯、细化和包覆等工艺采用本质安全性低的间断式反应釜工艺, 缺点是安全性低和线上爆炸物留存量大。微流控反应器具具有大面积/体积比和小尺寸微通道, 能够在爆轰临界直径下合成, 而且线上留存爆炸物很少, 为本质安全型。本文对比了连续相微流控、嵌段流微流控技术在化学合成上的技术优势, 得出嵌段流微流控解决了晶体产物堵塞微反应通道的难题, 提高了反应物的混合效率, 是高敏感性含能化合物合成和制备最有前景的创新技术。

关键词 微流控技术; 微嵌段流; 危险化学物质; 含能材料; 本质安全型

微流控技术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技术。由于微流控技术的微通道具有大的面积/体积比和尺度效应带来的高选择性和原位性, 微流控技术广泛应用于化学分析、基因分析、细胞筛分、聚合酶链反应(PCR)、化学合成、纳米材料制备等领域^[1]。微流控反应器应用于PCR, 大幅度提高了目标DNA的增值效率^[2-3]。通过催化修饰或极性修饰的微通道, 能够显著地提升化学反应的催化效率, 并且能够有效抑制副产物生成, 在手性物质合成中得到广泛应用^[4]。微流体的微量反应和混合均匀, 容易合成出粒度分布窄的纳米晶体, 同时能对晶体表面进行修饰, 广泛用于纳米材料制备^[5]。连续相微流控反应主要针对产物为液相的反应, 而嵌段流微流控技术很好地解决了固体产物堵塞微通道和微结构的难题, 广

泛应用于有固体产物生成的化学反应体系^[6]。由于工艺流程中微量合成带来的线上留存危险物质少、大表面积/体积比提高了热交换效率和避免了热点形成, 以及微尺度通道抑制爆炸作用, 微流控的化学合成和制备具有高本质安全性^[7-8], 并且逐步应用于如强氧化剂、硝基化合物、叠氮化合物等易燃易爆危险性化学品的合成和制备^[9-10]。

1 微流控化学合成技术的本质安全性和优良工艺性

1.1 危险化学物质的安全特性

本文所提危险化学物质是指一类极易受到机械、热和静电等刺激发生燃烧和爆炸的过氧化物、叠氮化

收稿日期: 2018-07-01; 修回日期: 2018-08-03

作者简介: 沈瑞琪, 教授, 研究方向为含能材料、火工品技术、空间推进技术、微系统技术以及激光与物质相互作用, 电子信箱: rqshen@njust.edu.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.

物、硝基化合物和氮杂环化合物等危险化学物质。这些物质能否发生燃烧和爆炸取决于感度值和临界直径等两个重要特征量,即导致燃烧和爆炸的最小激发能量阈值(发火感度)和燃烧、爆轰能够传爆下去的最小装药直径(临界直径)。部分典型炸药爆炸的温度阈值(5 s爆发点)和临界直径如表1所列。合成装置中只有同时满足刺激能量超过感度值和炸药堆积的直径超过临界直径后,这些物质才能发生燃烧和爆炸,所以只要将炸药合成和制备的容器尺度(微流控反应器的微通道直径)控制在小于临界直径时,反应器中不形成局部

表1 含能材料感度数据

Table 1 Sensitivity and critical diameter of explosive

含能材料	5 s爆发点/°C	临界直径/mm
叠氮化铅(LA)	320	0.01~0.02
三硝基间苯二酚(LTNR)	265	—
三硝基苯酚(PA)	320	9.2
太安(PETN)	225	0.9
黑索金(RDX)	260	1.2
奥克托金(HMX)	327	—

注:5 s爆发点数据引自文献[11],临界直径数据引自文献[12]。

热点,合成和制备工艺过程是本质安全的。

1.2 微化学反应器的本质安全性

微流控合成和制备技术是化学合成和纳米材料制备的革命性新技术^[13-14]。微化学反应系统(图1(c),图片来源:<http://www.oc.uni-koeln.de/griesbeck/XeClEx-cimer.htm>)由微通道组成的反应器芯片(图1(a),图片来源:<https://amarequip.com>)、微反应器 I/O 接口及液泵、在线检测和系统控制等周边辅助装置构成。

反应器面积与体积比值 A/V (单位: mm^2/mm^3) 是一个与本质安全性密切相关的特征量,表征着化学反应热与外界的交换速度和效率。 A/V 越高、反应器的热管理也越容易,反应器越不会发生因为局部热积累导致安全事故。传统间歇反应器与微型连续流动化学反应器的 A/V 相比较,微化学反应器(microreactor): $2000\sim 20000 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$; 微型反应器(millireactor): $1000\sim 2000 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$; 管式反应器(tubular reactor): $100\sim 500 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$; 搅拌容器反应器(stirred vessel): $4\sim 40 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ 。微化学反应器的 A/V 远高于传统的反应器,表明了微反应器比传统的反应器更加安全^[8]。

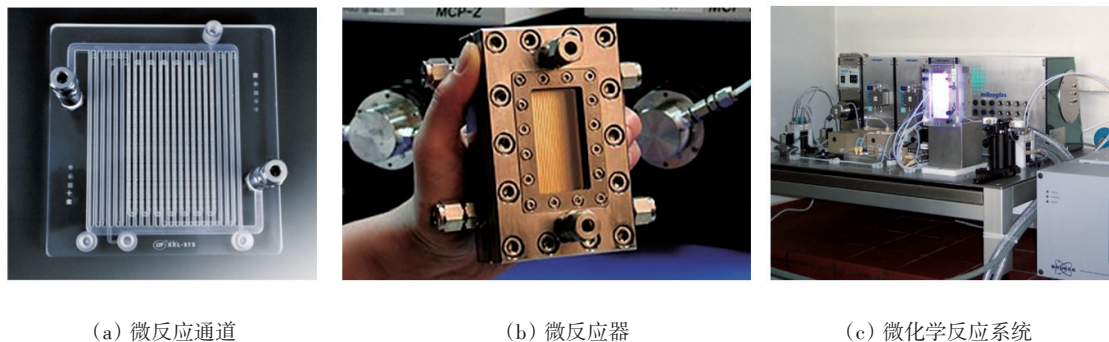


图1 微化学反应系统实例
Fig. 1 Micro chemical reactor

1.3 嵌段流的工艺性

嵌段流技术比较适合有固体产物生成的炸药合成和制备要求。在炸药合成反应中固相产物的形成、沉积、雍塞和结晶生长等容易导致微流控的通道和分离微结构堵塞,而嵌段流技术(micro-segmented flow)将是一个很好的解决方案^[6],如图2所示。嵌段流液滴被不相容的油相载液包裹和运输,液滴内的化学反应和晶体生长得到有效控制,分段的流动液滴防止了固体颗粒的堆积和雍塞。

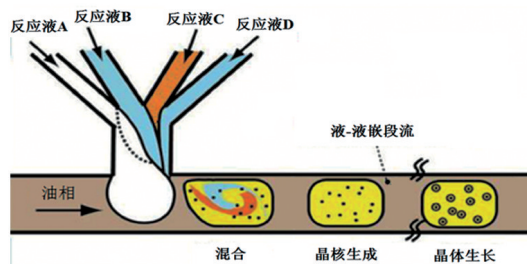


图2 油相作为载液的嵌段流控合成过程
Fig. 2 Synthesis process in micro-segmented flow by carrier of oil phase

嵌段流液滴在微通道中流动时液滴内的质点形成涡流,涡流以对流方式进行对液滴内的物料混合,嵌段流涡流对流混合的效率优于连续相微流控反应器的层流扩散混合^[15],如图3所示。

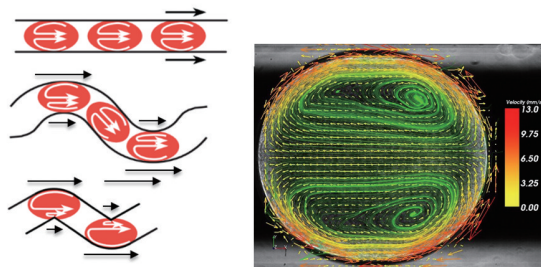


图3 微通道中嵌段流液滴内部的涡流矢量图
Fig. 3 Vortex of liquid drop in straight channel and curving channel

德国伊梅诺科技大学的 Köhler 团队最早开展嵌段流技术研究^[16-20]。采用嵌段流技术制备了微纳米 ZnO 颗粒^[21]、金颗粒^[22]、银颗粒^[23],以及核壳结构的聚合物颗粒^[24]。Nathalie 等^[25]设计了嵌段流合成系统,分别合成了晶体形貌规整,粒度分布均匀的 CaCO_3 、 BaTiO_3 、 $\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。Ismagilov 等^[26-27]利用嵌段流在硅胶管中产生纳升级别的分散相反应液滴,研究滞留时间、反应液浓度、酸碱度等反应条件对蛋白质结晶的影响规律,并利用显微跟踪观测方法获得了不同反应条件下蛋白质在反应液滴内的结晶过程图像。Duraismamy 等^[28]设计制作了聚二甲基硅氧烷(PDMS)嵌段流合成系统,在微通道内先合成具有晶种的溶液,再利用T型微通道产生分散相反应液滴,将含有纳米晶种的水溶液和其他反应液注入油相形成液滴。以液滴作为金晶体的成长环境,通过改变流体流速与反应液配比,获得了球形纳米金颗粒。嵌段流技术在化合物合成、纳米颗粒制备、晶体的包覆和改性、生物和化学分析检测、DNA分析、酶动力学分析等得到广泛应用^[29-30]。

2 危险化学物质的微流控合成

基于微流控的微反应器具有高效的热交换效率,精确控制反应条件,微尺度通道和剂量微量等特点,为本质安全型,在危险化学物质合成中应用前景良好。

过氧化氢是一种强氧化剂和推进剂成分,容易发生自然。Inoue 等^[31]设计了 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Pd/SiO_2 、 Pd/TiO_2 和 $\text{Pd}-\text{Au}/\text{TiO}_2$ (Pd 质量分数为 1%) 催化剂修饰的玻璃微

流控芯片,并且在室温(293 K)和 1 MPa 条件下直接从氢和氧合成了质量分数为 10% 过氧化氢溶液。Pau-novic 等^[32]以多孔 SiO_2 为载体的 Au-Pd 催化剂修饰微通道,如图4所示,直接合成了过氧化氢溶液。与常规的反应容器合成工艺相比,微化学反应合成得到的过氧化氢选择性和得率更高。

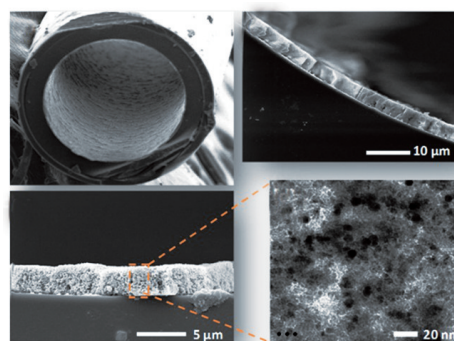


图4 多孔 SiO_2 层包覆的 $320 \mu\text{m}$ 内径毛细管截面(a), SiO_2 层(b)、(c)扫描电镜图和沉积 Au-Pd 合金纳米粒子(d)的 SiO_2 层透射显微镜图

Fig. 4 $320 \mu\text{m}$ ID capillary wash-coated with porous SiO_2 layer cross section of SiO_2 (a), coated capillary magnified SEM image of SiO_2 (b), (c), and wash-coat TEM image of alloy nanoparticles deposited on the SiO_2 lay (d)

硝基化合物具有爆炸性质,也是一类常用的含能材料,不同硝化程度的硝基甲烷可以作为炸药和推进剂的含能氧化剂。Roberge 等^[33]采用微化学反应器(图5)合成二硝基乙烷,得率达到 93%,高效液相色谱(HPLC)得到的纯度达到 94%。

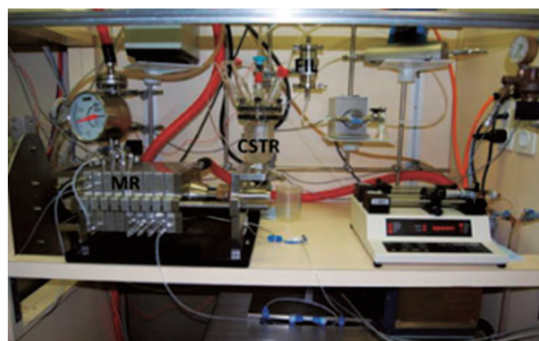


图5 二硝基乙烷合成的微反应系统
Fig. 5 Syntheses mini-plant of 2-nitroethanol

2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) 是一种重要的钝感炸药,能量约为黑索金(HMX)的 80%,但是对撞击、摩擦和静电的感度接近三氨基三

硝基苯(TATB)钝感炸药。

Zuckerman 等^[34]参照反应釜传统合成工艺路线采用微流控反应器从 DAPO 一步合成出了 LLM-105 单质炸药,其中 DAPO=2,6-diaminopyrazine-1-oxide, ANPZ=2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine, DMDNP=2,6-dimethoxy-3,5-dinitropyrazine, DMP = 2,6-dimethoxypyrazine。微

反应器流程如图 6 所示,得率为 50%~60%,与传统工艺相当。

叠氨基是一种高能基团。Mariëlle 等^[35]采用连续相微流控反应器在苯胺上连接叠氨基,合成出了具有爆炸性质的叠氮苯化合物,如图 7 所示。单元反应器的生产能力从 200 mg 提升到克级水平。

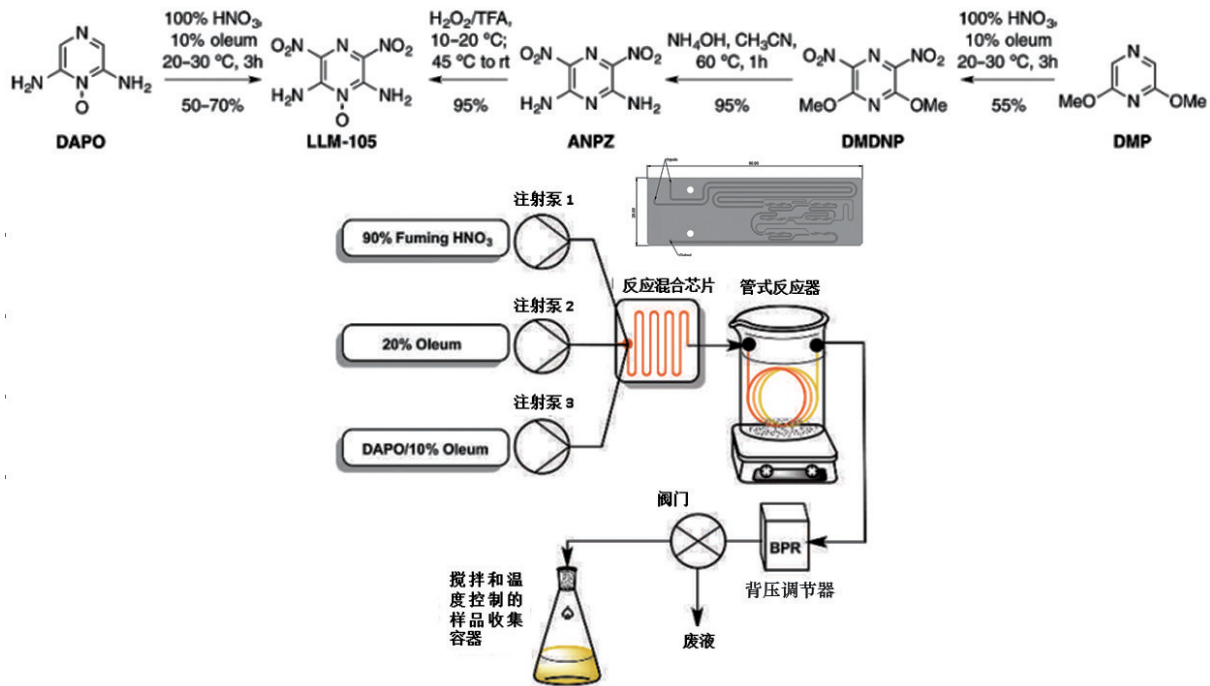


图 6 DAPO 合成 LLM-105 的流动硝化装置

Fig. 6 Flow nitration and quenching setup of DAPO to LLM-105

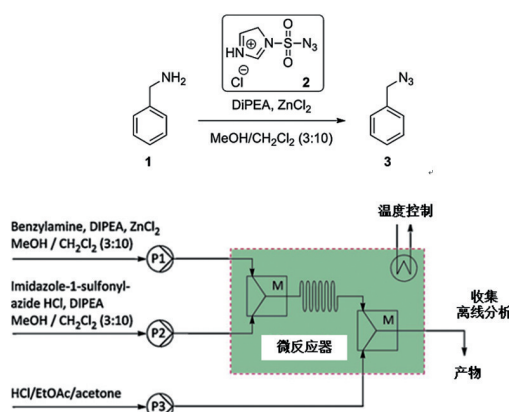


图 7 合成叠氨基苯的微反应器示意

Fig. 7 A schematic view of the microreactor setup of benzyl azide

刘换敏等^[36]应用嵌段流技术,采用 T 型微通道装置,以水为连续相,以硝化棉的乙酸乙酯溶液为分散相,制备出了外形圆润的球形发射药。南京理工大学

较早开展了三硝基甲苯二酚铅、三硝基二酚钡、硝酸胍镍等含能配位化合物,以及六硝基芪(HNS)炸药的纳米制备研究工作,研究表明微流控反应器合成的得率和晶体粒度分布都优于传统的反应釜间断合成工艺^[37-43]。三硝基间苯二酚铅(斯蒂芬斯铅)的合成工艺路线是三硝基间苯二酚与氢氧化镁反应生成三硝基间苯二酚镁,在与硝酸铅反应生成三硝基间苯二酚铅。从三硝基甲苯二酚镁合成铅配位化合物的嵌段流合成系统如图 8 所示。

嵌段流合成系统包括微流体驱动单元,有机玻璃(PMMA)-硅胶管嵌段流合成反应模块,温控单元。设计制作的 PMMA-硅胶管嵌段流合成反应模块以长 3.4 m、内径 0.8 mm、外径 2 mm 硅胶管作为微通道,并固定在 PMMA 沟槽内。研究结果表明,嵌段流合成的起爆药在晶形和粒度分布方面均优于间歇式反应釜合成。

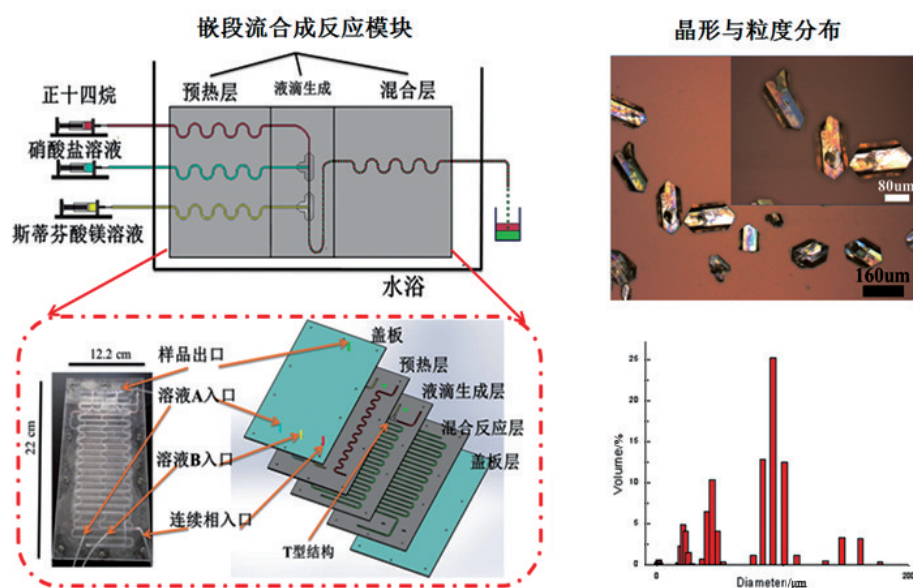
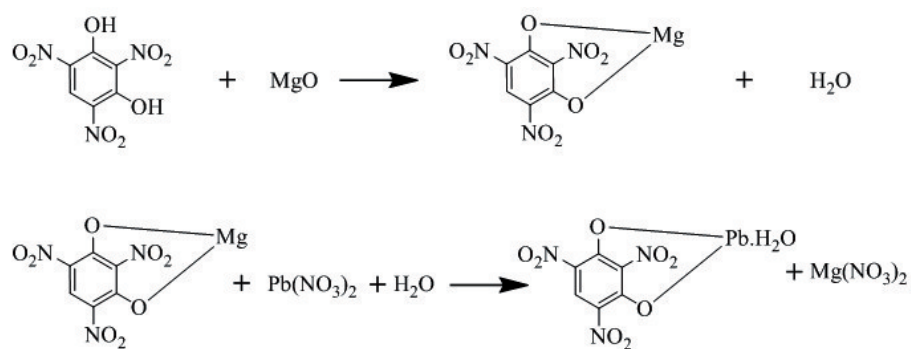


图8 嵌段流合成系统与嵌段流合成的起爆药晶形与粒度分布

Fig. 8 Primer explosive synthesis in micro-segmented flow and the crystal form

3 结论

微流控技术应用于炸药等危险化学物质的合成和制备是火炸药行业中一项革命性变革,从本质上解决了危险化学物质合成和制备的本质安全性问题。实现本质安全性的基础是小于临界直径下的微通道合成原理、最小爆炸物线上留存原则和避免因为摩擦和局部过热超过发火感度值,从根本上防止工艺线上的意外爆炸和发生爆炸后破坏力有限。微流控化学合成的优势是微通道流动合成,可以将通道宽度控制在爆炸物的临界直径以下,此外由于是微量流动合成,在线的爆炸物留存量为毫克量级,满足本质安全性合成的要求。目前微流控技术已经在合成化学和纳米材料制备中得到广泛应用,危险化学物质的微流控合成和制备正在积极探索和演示验证,取得了初步进展,证明了微

流控技术能够提高合成和制备化合物的品质,得率也比传统反应釜间段工艺高。目前微流控技术用于含能材料合成的条件还比较容易满足,但是部分合成物质需要在超低温和较高压力下完成,要求微流控反应器能够承受较高或较低温度,较高压力环境。未来需要进一步研究适合含能材料极端条件合成的微反应器技术,并且实现在线检测和模块化设计,通过有机的并联微反应器提高产能。

参考文献 (References)

- [1] 林柄承, 秦建华. 图解微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Lin Bingcheng, Qin Jianhua. Illustration of lab on a microflow chip[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] Ugaz V M. PCR in integrated microfluidic systems[M]//Integrat-

- ed Biochips for DNA Analysis. New York: Springer, 2007: 90–106.
- [3] Manage D P, Morrissey Y C, Stickel A J, et al. On-chip PCR amplification of genomic and viral templates in unprocessed whole blood[J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2011, 10(3): 697–702.
- [4] Wirth T. *Microreactors in organic synthesis and catalysis*[M]. Germany: Wiley-VCH Verlag, 2008.
- [5] Köhler J M, Kirner T, Wagner J, et al. Nanoparticle reactions on chip[J]. *Nato Science*, 2004, 152: 39–50.
- [6] Köhler J M, Cahill B P. *Micro-segmented flow: Applications in chemistry and biology*[M]. New York: Springer, 2014.
- [7] Zhang J S, Wang K, Zhang C Y, et al. Safety evaluating of Beckmann rearrangement of cyclohexanone oxime in microreactors using inherently safer design concept[J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2016, 110: 44–51.
- [8] Fei Y, Sun B, Zhang F, et al. Inherently safer reactors and procedures to prevent reaction runaway[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, 26: 1252–1283.
- [9] Rahman M T, Wirth T. Safe use of hazardous chemicals in flow [J]. *Topics in Heterocyclic Chemistry*, 2018 56: 343–374.
- [10] Singh R, Lee H J, Singh A K, et al. Recent advances for serial processes of hazardous chemicals in fully integrated microfluidic systems[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(8): 2253–2267.
- [11] 吴腾芳. 爆炸物识别图册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. Wu Tengfang. *Explosives recognition atlas*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [12] 黄寅生. 炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 125. Huang Yinsheng. *Explosive theory*[M]. Beijing: Ordnance Industry Publishing House, 2009: 125.
- [13] Liu Y, Jiang X. Why microfluidics? Merits and trends in chemical synthesis[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(23): 3960–3978.
- [14] Su Y F, Kim H, Kovenkloglu S, et al. Continuous nanoparticle production by microfluidic-based emulsion, mixing and crystallization[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2007, 180(9): 2625–2629.
- [15] Misuk V, Mai A, Zhao Y, et al. Active mixing inside double emulsion segments in continuous flow[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2015, 5(2): 101–109.
- [16] Li S, Roy A, Lichtenberg H, et al. Local structure of ZnO micro flowers and nanoparticles obtained by micro-segmented flow synthesis[J]. *Chemphyschem*, 2012, 13(6): 1557.
- [17] Budden M, Schneider S, Groß G A, et al. Microfluidic encoding: Generation of arbitrary droplet sequences by electrical switching in microchannels[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 189(189): 288–297.
- [18] Köhler J M, März A, Popp J, et al. Polyacrylamid/silver composite particles produced via microfluidic photopolymerization for single particle-based SERS microsensors[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(1): 313.
- [19] Chang Z, Serra C A, Bouquey M, et al. Multiscale materials from microcontinuous-flow synthesis: ZnO and Au nanoparticle-filled uniform and homogeneous polymer microbeads[J]. *Nanotechnology*, 2009, 21(1): 015605.
- [20] Li S, Gross G A, Günther P M, et al. Hydrothermal micro continuous-flow synthesis of spherical, cylinder-, star- and flower-like ZnO microparticles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 167(2/3): 681–687.
- [21] Li S, Roy A, Lichtenberg H, et al. Local Structure of ZnO micro flowers and nanoparticles obtained by micro-segmented flow synthesis[J]. *Chemphyschem*, 2012, 13(6): 1557–1561.
- [22] Hafermann L, Köhler J M. Small gold nanoparticles formed by rapid photochemical flow-through synthesis using microfluidic segment technique[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(2): 1–8.
- [23] Knauer A, Thete A, Li S, et al. Au/Ag/Au double shell nanoparticles with narrow size distribution obtained by continuous micro segmented flow synthesis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(3): 1164–1169.
- [24] Odetade D, Vladislavljevic G T. Microfluidic fabrication of hydrocortisone nanocrystals coated with polymeric stabilisers[J]. *Micromachines*, 2016, 7(12): 236.
- [25] Jongen N, Donnet M, Bowen P, et al. Development of a Continuous segmented flow tubular reactor and the "scale-out" concept – in search of perfect powders[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2010, 26(3): 303–305.
- [26] Chen D L, Gerdtts C J, Ismagilov R F. Using microfluidics to observe the effect of mixing on nucleation of protein crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(27): 9672–9673.
- [27] Li L, Mustafi D, Fu Q, et al. Nanoliter microfluidic hybrid method for simultaneous screening and optimization validated with crystallization of membrane proteins[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(51): 19243.
- [28] Duraiswamy S, Khan S A. Dual-stage continuous-flow seedless microfluidic synthesis of anisotropic gold nanocrystals[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2014, 31(4): 429–432.
- [29] Mashaghi S, Abbaspourrad A, Weitz D A, et al. Droplet microfluidics: A tool for biology, chemistry and nanotechnology[J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 82: 118–125.
- [30] Köhler J M, Li S, Knauer A. Why is micro segmented flow particularly promising for the synthesis of nanomaterials?[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2013, 36(6): 887–899.
- [31] Inoue T, Ohtaki K, Murakami S, et al. Direct synthesis of hydrogen peroxide based on microreactor technology[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 108: 8–11.

- [32] Paunovic V, Ordonsky V, D'Angelo M F N, et al. Direct synthesis of hydrogen peroxide over Au-Pd catalyst in a wall-coated microchannel[J]. *Journal of Catalysis*, 2014, 309(309): 325-332.
- [33] Roberge D M, Noti C, Irle E, et al. Control of hazardous processes in flow: Synthesis of 2-nitroethanol[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2013, 4(1): 26-34.
- [34] Zuckerman N B, Shusteff M, Pagoria P F, et al. Microreactor flow synthesis of the secondary high explosive 2,6-Diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105)[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2015, 5(3): 178-182.
- [35] 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.
- [36] 刘换敏, 李兆乾, 王彦君, 等. 微流控技术制备球形发射药及其表征[J]. *含能材料*, 2017, 25(9): 717-721.
Liu Huanmin, Li Zhaoqian, Wang Yanjun, et al. Preparation and characterization of spherical propellant by microfluidic technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(9): 717-721.
- [37] 房玉强. 基于微流控芯片的微混合技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
Fang Yuqiang. Micro mixing technology based on microfluidic chip[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [38] Fang Y, Ye Y, Shen R, et al. Mixing enhancement by simple periodic geometric features in microchannels[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 187(2): 306-310.
- [39] 朱朋, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 嵌段流合成三硝基间苯二酚铅[C]//第十六届中国科协年会论文集. 北京: 中国科学技术协会, 2014: 1-5.
Zhu Peng, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Synthesis of three nitro resorcinol lead by block flow[C]//Proceeding of the 16th Annual Meeting of China Association for Science and Technology, 2014: 1-5.
- [40] 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.
- [41] 朱莹. 嵌段流合成三硝基间苯二酚铅技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
Zhu Ying. Study on synthesis of trinitroresorcinol lead by block flow[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [42] 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.
Zhou Nan. Study on block flow synthesis and crystallization process of typical nitrophenol initiatives[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [43] 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*, 2017, 43(3): 286-293.

Microflow synthesis and preparation of hazard chemical materials

SHEN Ruiqi¹, ZHU Peng¹, YE Yinghua¹, XIA Huanming², ZHAO Shuangfei¹, CHEN Cong¹, YANG Yong¹

1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract Energetic materials are flammable and explosive hazard chemical materials which might explode with a slight excitation, such as the mechanical force, the heat and the static electricity. The conventional processes of synthesis, separation, purification, refining and coating for energetic materials use the internal stirred vessel technology, with a low safety and with large scale explosives kept in line. The microchannel reactor is an essential security technology, because of high ratio of surface/volume and small microchannel, in which the size of the microchannel can be designed in smaller size than the detonation critical diameter of explosives, with a small amount of explosives in line. The continuous phase micro-flow technology is widely used in synthesis and analysis of chemical materials, but the microchannel is easily blocked by solid products. The micro-segmented flow treatment is easier than that of the continuous phase flow. The innovated micro-segmented flow technology is specifically suitable for the synthesis of high sensitivity hazard compounds, because of its capabilities in block-free and high efficiency mixing.

Keywords micro flow; micro-segmented flow; hazard chemical material; energetic materials; intrinsically safe ●



(责任编辑 刘志远)