

文章编号:1006-9941(2023)06-0546-06

DNTF/PDMS/NC 基含能油墨制备与性能

刘颂金¹,高磊¹,刘晓磊²,李春燕¹,谢占雄³,安崇伟¹,王晶禹¹

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051; 2. 海军装备部驻成都第二军事代表室, 四川 成都 610000; 3. 西安长峰机电研究所, 陕西 西安 710000)

摘要: 为获得与喷墨打印技术兼容且在微尺度下稳定爆轰的全溶型炸药油墨,设计了以3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)为主体炸药,聚二甲基硅氧烷(PDMS)和硝化纤维素(NC)为复合黏结体系的含能油墨。使用粘度计、电子密度仪和高速摄影仪等设备,探究了含能油墨流变特性和可打印性,采用扫描电子显微镜、纳米压痕仪及BAM撞击感度测试仪等仪器,表征了喷墨沉积样品微观形貌、力学性能和安全性能。结果表明:DNTF基含能油墨与喷墨打印技术相容性良好,复合黏结体系能够将炸药颗粒紧密黏结。制得样品DNTF基复合物最大弹性模量达到6.438 GPa;其撞击感度和摩擦感度能量较于原料DNTF分别提升了6.5 J和24 N;在长100 mm、宽1 mm及深度1 mm的沟槽中爆速达到了7927 m·s⁻¹。

关键词: 喷墨打印;含能油墨;机械感度;3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)

中图分类号: TJ55; TQ560

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023051

0 引言

微机电系统(Micro Electronic Mechanical Systems, MEMS)火工品采用微机电的设计思想和制造技术,将微型装药、微换能元、微电子线路等集成在一个芯片上,共同组成一个发火或起爆序列,被称为第四代火工品^[1-2]。其中,微装药技术作为含能器件的关键技术,既要在毫米级甚至微米级含能器件的复杂结构上实现精准装药,也要保证装药能够在微尺度下可靠传爆。传统的装药方法(压装法、铸装法等)已较难适用,须采用与MEMS含能器件相兼容的技术。当前,许多含能材料沉积技术进展不断,其中包括磁控溅射^[3]、电泳沉积^[4]等技术。这些技术尽管能够将含能材料沉积在基板上,但是难以沉积亚微米级复杂的几何形状,较难满足微含能器件上所需的复杂结构要求。

而通过3D打印技术,利用含能墨水对MEMS含能器件进行微尺度装药,能够有效地解决装药精度和装药一致性问题。其中,含能油墨配方的设计对于利用3D打印技术实现微装药尤为关键。近年来含能墨水配方的设计逐渐成为研究焦点^[5-14]。例如,Ihnen^[15-16]研究了以环三亚甲基三硝胺(RDX)、季戊四醇四硝酸酯(PETN)为主体炸药的全液型含能油墨,并探究工艺参数如基板温度、液滴间距对沉积形貌的影响。中北大学安崇伟课题组^[10-14]设计了一系列以CL-20为主体炸药的含能油墨,通过直写或喷墨的方式实现了微尺度装药。而应对愈发复杂化、多样化的需求,适用于喷墨打印技术的炸药油墨配方多样化稍显不足,需进一步开发新的炸药油墨配方。

3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)理论密度达到1.937 g·cm⁻³,具有能量密度高、感度适中、热安定性良好、威力大的特点,各项性能接近CL-20,是一种综合性能优异的高能量密度材料^[17]。同时其临界传爆尺寸低于CL-20^[18],而以DNTF为主体炸药的含能油墨相关研究较少^[19-20]。聚二甲基硅氧烷(PDMS)具有良好的热稳定性和黏结性,应用在高聚物黏结炸药(PBX)中,能够提升炸药力学性能,同时降低炸药机械感度^[21-23]。鉴于此,本研究以DNTF为主体炸药,

收稿日期:2023-03-12;修回日期:2023-04-16

网络出版日期:2023-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助(22275170)

作者简介:刘颂金(1998-),男,硕士研究生,主要从事含能材料3D打印研究。e-mail:1457311886@qq.com

通信联系人:安崇伟(1980-),男,教授,主要从事新型传爆药技术研究。e-mail:anchongwei@yeah.net

引用本文:刘颂金,高磊,刘晓磊,等. DNTF/PDMS/NC 基含能油墨制备与性能[J]. 含能材料,2023,31(6):546-551.

LIU Song-jin, GAO Lei, LIU Xiao-lei, et al. Preparation and Performance of DNTF/PDMS/NC-based Energetic Ink[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(6):546-551.

PDMS与刚性高分子硝化纤维素(NC)共混作为黏结体系设计含能油墨,利用喷墨打印技术直接沉积制备成型样品,并对其微观形貌、力学性能和爆轰性能等进行测试和表征。

1 实验部分

1.1 实验材料

DNTF(中国兵器工业集团公司805厂),道康宁184(道康宁公司),NC(中国兵器工业集团公司255厂),乙酸乙酯(EA,分析纯,天津市福晨化学试剂厂)。

1.2 油墨配制及样品制备

油墨配制:道康宁184由PDMS预聚物和固化剂组成,故而需要将PDMS预聚物和固化剂按照10:1质量比混合制备PDMS。按质量比将DNTF(18%)、PDMS(1.2%)、NC(0.8%)溶于乙酸乙酯(80%)中,超声30 min至溶质完全溶解。用60目尼龙网将配好的油墨过滤以除去配制过程中混入的杂质。

样品制备:用吸管将油墨移入注射器中。通过调节压电控制器的行程、脉冲、循环等参数控制含能油墨出墨量及出墨频率,在进气压、脉冲、循环及行程分别为0.1 MPa、0.29 ms、5 ms及42%条件下,利用喷墨打印平台将油墨直接沉积到预处理的铝板上。保持加热平台温度为50℃,使低沸点溶剂大部分挥发的同时,通过热引发使黏结体系交联固化,得到DNTF基含能复合物。

1.3 性能测试与表征

在使用0号转子、转速为60 s⁻¹及60个采样点数的条件下,通过LVDV-1粘度计测量油墨粘度3次,取平均值;使用QBZY-3全自动表面/界面张力仪测量油墨表面张力3次,取平均值;使用MZ-220SD电子密度仪测量油墨密度3次,取平均值。通过i-speed 508高速摄影仪拍摄含能油墨喷射行为和液滴飞行过程。

通过扫描电镜(SEM, Tescan MIRA3 LMH)对DNTF基含能复合物形貌进行表征,在真空度10⁻⁶ Pa下对样品表面进行喷金处理,加压10 kV。

通过X射线衍射(XRD, Haoyuan DX-2700)对原料DNTF及DNTF基含能复合物晶型进行表征,在管电压为40 kV的靶材(Cu),电流30 mA,步进角度0.03°,角度范围5°~50°条件下进行测试。

使用G200纳米压痕仪,对DNTF基含能复合物力学性能进行表征,获得材料的载荷-位移曲线。选取楔形头、静态载荷模式,应力范围为0~500 mN。

采用BFH-12型BAM撞击感度仪对原料DNTF及DNTF基含能复合物进行撞击感度测试^[24]。测试条件:试验药量:(10±1) mm³,试验环境温度:(20±5)℃;试验相对湿度:≤80%,落锤质量0.5 kg。

采用FSKM10型摩擦感度测试仪对原料DNTF及DNTF基含能复合物进行摩擦感度测试^[25]。测试条件:试验药量:(10±1) mm³,试验环境温度:(20±5)℃;试验相对湿度:≤80%。

采用微通道爆轰实验^[26]测试DNTF基含能复合物临界传爆尺寸。将含能油墨直接沉积到长100 mm、宽1 mm的楔形凹槽。楔形槽深度由3 mm线性递减至0,测量起爆后炸痕长度,如图1a所示。将含能油墨沉积到长100 mm、宽1 mm及深度1 mm的沟槽,采用电离导通式电探针法测试样品爆速,如图1b所示。

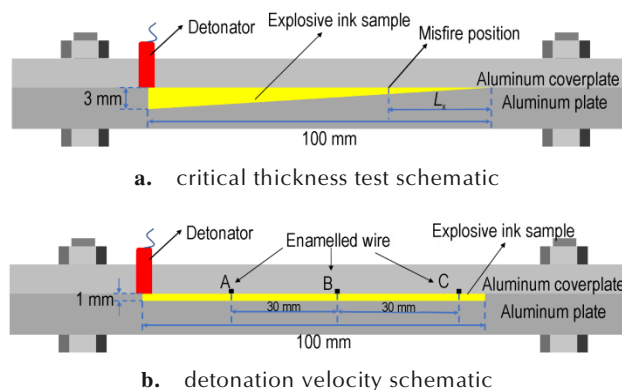


图1 临界厚度和爆速测试示意图^[26]

Fig.1 Schematic of critical thickness test and detonation velocity test^[26]

2 结果与讨论

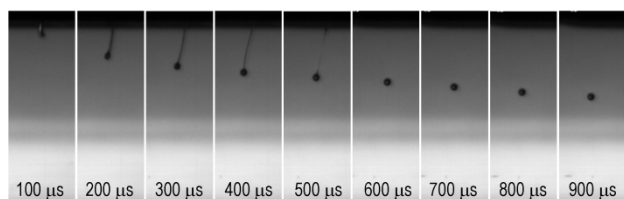
2.1 油墨可打印性

含能油墨想要实现利用喷墨打印技术进行微尺度装药,其可打印性至关重要。油墨可打印性主要取决于油墨的粘度、表面张力和密度^[27]。基于这些参数,Fromm等^[28]定义奥内佐格数(Oh)表征液滴形成,Z为Oh的倒数,进而提出当Z>2时能够稳定产生液滴,其计算公式如式(1)所示。其后,Derby等^[29]通过数值模拟液滴成型过程认为Z值应在1到10之间,Jang等^[30]观察油墨喷射行为得出Z值应在4到14之间。研究通过实验测得DNTF基含能油墨粘度、密度和表面张力分别为3.84 mPa·s、283.96 kg·m⁻³以及21.876 mN·m⁻¹,喷嘴直径为0.1 mm,得出Z值为6.49,满足油墨可打印的要求。

$$Z = \frac{\sqrt{\gamma\rho\alpha}}{\eta} \quad (1)$$

式中, ρ 为油墨密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; η 为油墨粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; γ 为油墨表面张力, $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$; α 为喷嘴直径, mm 。

为进一步判断 DNTF 基油墨能否实现高精度喷墨沉积, 借助高速摄影设备拍摄油墨喷射行为和液滴飞行过程, 如图 2a 所示。可以观察到, DNTF 基油墨在喷射时形成了圆头液柱, 这是由于油墨与喷嘴材料间表面张力存在差异。而后在飞行过程中能够稳定形成近球形液滴, 同时也无卫星液滴的出现, 意味着本研究制备的含能油墨能够进行高质量喷墨打印, 具备良好的可打印性。最终成型样品如图 2b 所示, 整体呈米黄色, 表面光滑。



a. high-speed photograph of ink droplet jetting



b. DNTF-based energetic film forming sample

图 2 DNTF 基油墨液滴喷射高速摄影图及 DNTF 基含能复合物成型样品图

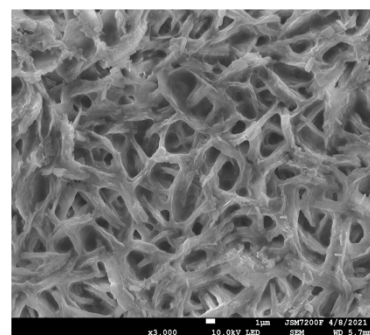
Fig.2 High-speed photograph of ink droplet jetting and sample photograph of DNTF-based energetic composites

2.2 样品形貌分析

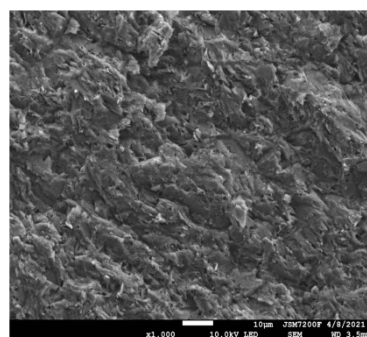
探究喷墨打印制备 DNTF 基含能复合物成型效果, 利用 SEM 表征其表面和横截面, 结果如图 3 所示。图 3a 是表面电镜图, 可以观察到, 样品表面形成致密的网状结构, 这是由于加热条件下, PDMS 双组分黏结剂进行加成反应, 能够形成立体交联结构。同时, 刚性高分子硝化纤维素能够作为骨架起到支撑作用。在图 3b 中截面图显示, 通过逐层沉积所制备的样品, 层与层间紧密黏合。故而, PDMS/NC 黏结体系能够黏结炸药颗粒, 且具备良好的成型效果。

2.3 XRD 分析

由于打印过程中涉及炸药颗粒重结晶, 需确认样品晶型是否发生改变, 原料 DNTF 和 DNTF 基含能复



a. DNTF-based energetic film surface (3000 \times)



b. DNTF-based energetic film cross-section (1000 \times)

图 3 DNTF 基含能复合物的 SEM 照片

Fig.3 SEM photos of DNTF based energetic composites

合物 XRD 测试结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, DNTF 基含能复合物与原料 DNTF 在 11.78° , 16.55° , 21.14° , 23.54° 及 28.22° 的特征峰基本符合, 说明在含能复合物制备的过程中, DNTF 的晶型并未发生改变。而 DNTF 基含能复合物样品衍射特征峰强度偏弱, 是由于在皮升量级的喷墨打印中, 所形成液滴体积较小, 在加热平台加热下低沸点溶剂迅速挥发, 炸药颗粒重结晶时间短暂导致粒径减小, 弱化了 X 射线衍射峰强度。同时, 非晶相的黏结体系也会使得 DNTF 基含能复合物衍射峰强度变弱。

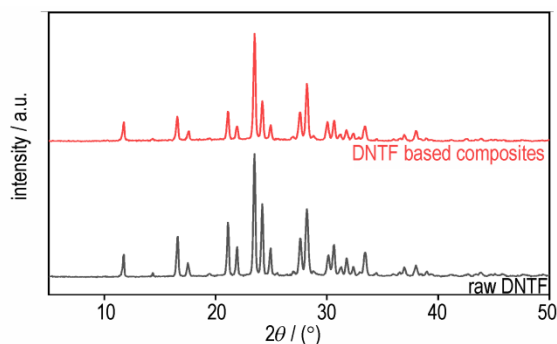


图 4 原料 DNTF 和 DNTF 基含能复合物的 XRD 谱图

Fig.4 XRD patterns of raw DNTF and DNTF-based energetic composites

2.4 弹性模量

弹性模量是衡量物体对弹性形变抵抗力的重要指标,图5为DNTF基含能复合物纳米压痕加载-卸载循环后所得的典型载荷-位移曲线,表示所测样品的最大弹性模量为6.438 GPa,抗弹性形变较好。这是由于PDMS主链是由键角较大的Si—O—Si键构成,使得Si—O键容易旋转,链柔顺性较好。同时,PDMS双组分热固化后形成的立体交联网状结构,能够有效地抵抗含能复合物的弹性形变。

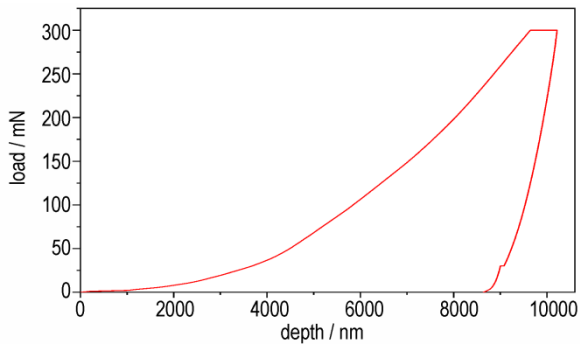


图5 DNTF基含能复合物载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of DNTF-based energetic composites

2.5 机械感度

机械感度是表征含能材料安全性能的重要参数,原料DNTF和DNTF基含能复合物的撞击感度与摩擦感度测试结果如表2所示。在撞击感度测试中,与原料DNTF撞击感度相比,DNTF基含能复合物撞击感度为13.5 J,降感效果显著。这是由于DNTF基含能复合物中炸药颗粒分布较为均匀,同时粒径相对于原料大大减小,比表面积增大,导致其受到同等的撞击能量下,较原料DNTF颗粒数量更多,使得单个颗粒承担的冲击能量更小,造成撞击感度降低;而黏结剂有效包覆炸药颗粒亦使得撞击感度降低。

而摩擦感度测试结果表明,DNTF基含能复合物较于原料摩擦感度降低。这可能是由于在开放环境中,黏结体系形成的网状结构与残余溶剂的挥发使得DNTF基含能复合物内部孔隙随机排布,有助于将能

表1 原料DNTF和DNTF/PDMS-NC复合物撞击感度及摩擦感度

Table 1 Impact sensitivity and friction sensitivity of raw DNTF and DNTF-based energetic composites

samples	impact sensitivity / J	friction sensitivity / N
raw DNTF	6	120
DNTF based composites	13.5	144

量耗散到周围环境而不是充当热点。同时,黏结剂也能够起到钝化作用降低摩擦感度。因此,制备的DNTF基含能复合物具有较好的安全性能。

2.6 临界传爆尺寸和爆速

临界传爆尺寸和爆速是微尺寸结构装药爆轰能力的重要参数,能够反映微含能器件在微尺度下实现稳定爆轰。其计算公式^[26]如下:

$$d_c = \frac{C}{A} \times (A - B) \quad (2)$$

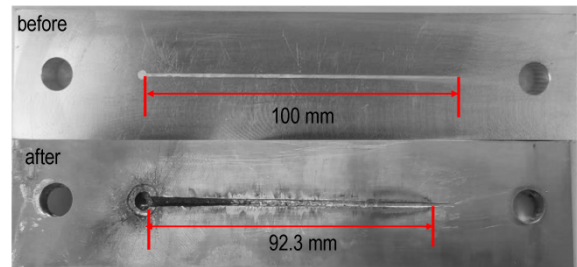
式中, A 为楔形槽装药长度,mm; B 为楔形槽爆炸长度,mm; C 为楔形槽最大深度,mm; d_c 为临界传爆尺寸,mm。

爆速(V)计算公式^[26]如下:

$$V = \frac{\frac{30 \times 10^{-3}}{\Delta t_1} + \frac{30 \times 10^{-3}}{\Delta t_2}}{2} \quad (3)$$

式中, Δt_1 为爆轰波从A到B耗费的时间,ns; Δt_2 为爆轰波从B到C耗费的时间,ns。

图6a为临界传爆尺寸测试前后铝板图片,可以观察到DNTF基含能复合材料沉积在宽度为1 mm的楔形槽内。起爆后,如果装药厚度低于临界传爆尺寸,爆轰将不再传递。实验后,测得传爆长度为92.3 mm,而楔形槽最大深度为3 mm,故由公式(2)得出临界传爆厚度为0.231 mm。图6b为爆速测试前后铝板图



a. comparison before and after the critical diameter test



b. comparison before and after the explosion velocity test

图6 DNTF基含能复合物临界直径与爆速测试

Fig. 6 Critical diameter and detonation velocity tests of DNTF-based energetic composites

片。实验测得 Δt_1 和 Δt_2 值分别为 3725 ns 和 3846 ns, 由公式(3)计算爆速为 $7927 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此, DNTF 基含能油墨能够通过喷墨打印技术精准地沉积在预定的沟槽中, 并展现出了良好的微尺度传爆能力。

3 结论

(1) 本研究设计了一种以 DNTF 为主体炸药, PDMS 和 NC 为复合黏结体系的含能油墨。含能油墨具备良好的可打印性, 同时可利用喷墨打印技术直接沉积制备含能薄膜样品, 成型效果较好。

(2) 经由热引发交联固化的 DNTF 含能薄膜截面黏合紧密, 最大弹性模量达到 6.438 GPa; XRD 图谱表明制备的 DNTF 基含能复合物中主体炸药 DNTF 晶型并未发生改变; 其撞击感度和摩擦感度分别为 12.5 J 和 144 N, 相较于原料 DNTF 感度得到降低。

(3) 爆轰测试结果表明 DNTF 基含能复合物临界传爆尺寸为 $1 \text{ mm}\times 0.231 \text{ mm}$, 爆速为 $7927 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 说明其在微尺度装药后成型样品具备良好的传爆能力, 在 MEMS 含能器件中具备一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] 褚恩义, 贺爱锋, 任西, 等. 火工品集成技术的发展机遇与途径[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 205-207.
CHU En-yi, HE Ai-feng, REN Xi, et al. Development opportunities and approaches of pyrotechnic integration technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(3): 205-207.
- [2] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
YE Ying-hua. *Pyrotechnic technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [3] PETRANTONI M, ROSSI C, SALVAGNAC L, et al. Multilayered Al/CuO thermite formation by reactive magnetron sputtering: Nano versus micro[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8):084323.
- [4] ZHANG D, LI X, QIN B, et al. Electrophoretic deposition and characterization of nano-Al/Fe₂O₃ thermites[J]. *Materials Letters*, 2014, 120: 224-227.
- [5] 朱自强, 陈瑾, 谯志强, 等. CL-20 基直写炸药油墨的制备与表征[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 235-238.
ZHU Zi-qiang, CHEN Jin, QIAO Zhi-qiang, et al. Preparation and characterization of CL-20-based direct writing explosive ink[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 235-238.
- [6] WANG D, ZHENG B, GUO C, et al. Formulation and performance of functional sub-micro CL-20-based energetic polymer composite ink for direct-write assembly[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(113): 112325-112331.
- [7] 姚艺龙, 吴立志, 唐乐, 等. 纳米 CL-20 炸药含能墨水的直写规律[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 39-42.
YAO Yi-long, WU Li-zhi, TANG Le, et al. Direct writing rule of energetic ink for nano CL-20 explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(1): 39-42.
- [8] DUNJU W, CHANGPING G, RUIHAO W, et al. Additive manufacturing and combustion performance of CL-20 composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 55(7): 2836-2845.
- [9] 黄璠. CL-20、TATB 基复合装药结构的 3D 打印成型及安全性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
HUANG Jin. 3D printing and safety research of CL-20 and TATB-based composite charge structures[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019.
- [10] 李千兵, 安崇伟, 徐传豪, 等. Viton/PVA 粘结剂乳液的设计及其在炸药油墨中的应用[J]. 含能材料, 2019, 27(1): 60-67.
LI Qian-bing, AN Chong-wei, XU Chuan-hao, et al. Design of Viton/PVA binder emulsion and its application in explosive inks[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(1): 60-67.
- [11] 徐传豪. 微纳结构含能复合物的喷墨打印成型及应用基础研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
XU Chuan-hao. Basic Research on Inkjet Printing and Application of Micro-Nano-Structured Energetic Composites[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [12] 郭浩. CL-20 基光固化炸药油墨设计与 3D 直写成型技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
GUO Hao. CL-20-based light-curing explosive ink design and 3D direct writing technology research[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [13] 孔胜, 安崇伟, 徐传豪, 等. CL-20 基含能薄膜的微双喷直写成型与性能[J]. 含能材料, 2020, 28(11): 1048-1053.
KONG Sheng, AN Chong-wei, XU Chuan-hao, et al. Micro-double jet direct writing and properties of CL-20-based energetic films[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(11): 1048-1053.
- [14] 朱国豪, 叶宝云, 安崇伟, 等. CL-20 基爆炸网络装药的 UV 光辅助直写成型及性能[J]. 含能材料, 2021, 29(4): 293-299.
ZHU Guo-hao, YE Bao-yun, AN Chong-wei, et al. UV light-assisted direct writing and properties of CL-20-based explosive network charge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(4): 293-299.
- [15] IHNEN A C, PETROCK A M, CHOU T, et al. Crystal morphology variation in inkjet-printed organic materials[J]. *Applied surface science*, 2011, 258(2): 827-833.
- [16] IHNEN A C, PETROCK A M, CHOU T, et al. Organic nanocomposite structure tailored by controlling droplet coalescence during inkjet printing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(9): 4691-4699.
- [17] 胡焕性, 张志忠, 赵凤起, 等. 高能量密度材料 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃性能及应用研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 155-158.
HU Huan-xing, ZHANG Zhi-zhong, ZHAO Feng-qi, et al. Properties and applications of 3,4-dinitrofurazan oxidized furazan, a high energy density material[J]. *Journal of Military Engineering*, 2004, 25(2): 155-158.
- [18] LI Y, YUAN J M, ZHAO W, et al. Application and development of 3,4-Bis(3-nitrofurazan-4-yl) furoxan (DNTF)[J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2021, 91(3): 445-455.
- [19] HE Y, GUO X, LONG Y, et al. Inkjet printing of GAP/NC/DNTF based microscale booster with high strength for py-

- roMEMS[J]. *Micromachines (Basel)*, 2020, 11(4).
- [20] XU C, AN C, LONG Y, et al. Inkjet printing of energetic composites with high density [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(63): 35863–35869.
- [21] ELBEIH A, ZEMAN S, JUNGOVA M, et al. Effect of different polymeric matrices on the sensitivity and performance of interesting cyclic nitramines [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2012, 9(2): 17.
- [22] ELBEIH A, ZEMAN S, JUNGOVA M, et al. Effect of different polymeric matrices on some properties of plastic bonded explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(6): 676–684.
- [23] BURCH A C, KAY L M, YEAGER J D, et al. The effect of hardness on polymer-bonded pentaerythritol tetranitrate (PETN) explosive impact sensitivity [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(1).
- [24] GRUHNE M S, LOMMEL M, WURZENBERGER M, et al. Back Cover: OZM Ball drop impact tester (BIT2) vs. BAM standard method—a comparative investigation [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2020, 45(1):160–160.
- [25] KIM E Y, HONG D Y, HAN M, et al. Desensitization of high explosives by encapsulation in metal-organic frameworks [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 407:127882.
- [26] YE B-Y, SONG C-K, HUANG H, et al. Direct ink writing of 3D-Honeycombed CL-20 structures with low critical size [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(3): 588–595.
- [27] DERBY B. Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40(1): 395–414.
- [28] FROMM J E. Numerical calculation of the fluid dynamics of drop-on-demand jets [J]. *Ibm Journal of Research & Development*, 2010, 28(3): 322–333.
- [29] REIS N, DERBY B. Ink Jet Deposition of ceramic suspensions: modeling and experiments of droplet formation [J]. *MRS Proceedings*, 2011, 625.
- [30] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of fluid physical properties on ink-jet printability [J]. *Langmuir*, 2009, 25(5): 2629–2635.

Preparation and Performance of DNTF/PDMS/NC-based Energetic Ink

LIU Song-jin¹, GAO Lei¹, LIU Xiao-lei², LI Chun-yan¹, XIE Zhan-xiong³, AN Chong-wei¹, WANG Jing-yu¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Second Military Representative Office of the Navy Equipment Department in Chengdu, Chengdu 610000, China; 3. Xi'an Changfeng Institute of Mechanical and Electrical Research, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to obtain a fully solution-based explosive ink that was compatible with inkjet printing technology and stably detonated at the microscale, an energetic ink was designed by exploiting 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) as the main explosive and polydimethylsiloxane (PDMS)/nitrocellulose (NC) as the composite binder. The rheological properties and printability of energetic inks were explored by viscometer, electron densitometer, and high-speed photographic instrument. The microscopic morphology, mechanical properties, and safety performance of inkjet-deposited samples were characterized using scanning electron microscopy, nanoindenter, and BAM impact sensitivity tester. The results show that the DNTF-based energetic ink is compatible with inkjet printing technology. The composite bonding system could bind the explosive particles tightly. The maximum elastic modulus of DNTF-based composites reaches up to 6.438 GPa; Compared with the raw DNTF, the impact sensitivity and friction sensitivity of DNTF-based composites increase by 6.5 J and 24 N, respectively. In the groove with 100 mm length, 1 mm width, and 1 mm depth, the detonation velocity of sample reaches $7927 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: inkjet printing; energetic ink; mechanical sensitivity; 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF)

CLC number: TJ55; TQ560

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023051

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 22275170)

(责编:王馨逸)