

文章编号:1006-9941(2022)09-0903-08

直写打印硝化棉基内嵌多方孔发射药及其性能

凡文蕊¹,熊 鹏²,宋育芳¹,肖乐勤¹,赵其林²,李纯志²,周伟良¹

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646605)

摘要: 针对传统工艺无法制备复杂结构发射药的问题,为探索提高发射药燃面渐增性新途径,采用3D直写打印技术,设计并打印了具有较高燃面渐增性的硝化棉基内嵌多方孔发射药。对3D打印的硝化棉基内嵌多方孔发射药进行了定容燃烧和内弹道性能表征。结果表明,以硝化棉、含能增塑剂和溶剂配制的浆料为打印物料,打印的硝化棉基内嵌多方孔发射药符合设计的燃面渐增性燃烧预期;受打印针头直径、溶棉比、醇酮比、溶剂挥发速度等因素的影响,直写打印的发射药设计尺寸和实际尺寸有一定偏差;12.7 mm机枪弹道初步试验表明,内嵌多方孔NC-120发射药和制式D-4/7混合装药16 g,装药比例1:1时,膛压为314.2 MPa,射击初速为854.1 m·s⁻¹,实现了直写打印内嵌多方孔发射药在膛内正常、稳定燃烧,达到了与制式发射药相似的水平,但充分利用直写打印内嵌多方孔发射药需要进一步优化设计药形、弧厚、内外层弧厚匹配等参数。

关键词: 直写打印;发射药;燃烧性能;弹道性能

中图分类号: TJ411

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022007

0 引言

发射药是弹丸获取能量的基础和来源,其组成、结构和制备工艺是决定身管武器发射威力的关键因素。由于传统发射药制备工艺技术的限制,实现高能量释放效率的途径是有限的,而目前提高火炮发射威力和弹道效率的有效方法主要是实现发射药渐增性燃烧^[1-2],实现发射药渐增性燃烧的主要途径是调控发射药燃速和燃面,而燃面控制技术是更好的选择^[3-4];传统发射药制备药形相对简单,一般为柱状、管状、多孔、片状等形状^[5],因而通过传统压伸成型工艺方式实现发射药渐增性燃烧是有限的。3D打印技术通过分层加工、叠加成型的方式,可制造出复杂形状的物体,为设计和打印燃面渐增性较高的发射药提供了可行的技术途径^[6-7]。

目前可供尝试用于发射药的3D打印方法主要有

直写成型^[8]和光固化成型^[9],根据成型原理,挤出成型、喷墨打印和熔融沉积成型3D打印技术可归入直写成型。张洪林^[10]提出了一种基于3D打印技术的三维发射药模型,通过计算其燃烧过程中燃面变化,从理论上证实了3D打印较高燃面渐增性发射药的可能性。周梦蕾等^[11]设计了基于直写成型技术的3D打印设备并打印了硝化棉(NC)+含能塑化剂的简单药形发射药。光固化3D打印成型技术虽有固化速度快、稳定性高、表面粗糙度低等优点,但光固化树脂为非含能材料,会导致能量较低,同时较大的固含量会屏蔽固化光线^[12],杨伟涛等^[13]采用光固化3D打印技术成功制备了光固化树脂+黑索今(RDX)含能添加剂的尺寸精度较高的超多孔发射药,但较低的能量容易导致膛内燃烧不完全而出现残渣,能量和燃烧完全性尚需提高。喷墨打印技术虽可简单、高效地实现打印材料薄膜沉积和图案化,但受物料的粘度、表面张力、黏结剂种类、基板温度和微滴间距等物理性能和工艺条件影响较大^[14]。从发射药使用要求和原料特性看,理论上热塑性弹性体+含能填料的发射药配方可以采用熔融沉积成型,但目前可以熔融打印的含能材料主要为三硝基甲苯(TNT)及TNT基的熔铸炸药,缺少熔融温度低、安全性能良好和填充固体含能材料后力学性

收稿日期:2022-01-08;修回日期:2022-04-07

网络出版日期:2022-08-08

作者简介:凡文蕊(1995-),男,硕士研究生,主要从事含能材料3D打印的研究。e-mail:f15836258890@163.com

通信联系人:周伟良(1963-),男,研究员,主要从事推进剂及发射药的研究。e-mail:w1zhou@njust.edu.cn

引用本文:凡文蕊,熊鹏,宋育芳,等.直写打印硝化棉基内嵌多方孔发射药及其性能[J].含能材料,2022,30(9):903-910.

FAN Wen-ru, XIONG Peng, SONG Yu-fang, et al. Direct Ink Writing and Properties of Nitrocellulose-based Gun Propellants Embedded with Multi-cubic Pores [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(9):903-910.

能好的热塑性弹性体^[15-16]。而直写成型技术具有材料适用范围广、柔性加工、生产周期短、效率高、成本低和精确控制等众多优点,受到了广泛关注^[17-21]。

针对硝化棉和含能增塑剂为配方的发射药具有能量高、燃烧完全性好和配方成熟等特点,结合直写成型3D打印技术的优势,本研究以硝化棉、含能增塑剂和溶剂配制的浆料开展了基于直写成型发射药打印技术对发射药三维建模、浆料打印特性与尺寸精度较高的内嵌多方孔发射药制备等研究,探索基于直写打印的复杂发射药形设计方法与制备技术。

1 实验部分

1.1 打印原理

采用直写成型技术(Direct Ink Writing, DIW)进行3D打印,直接在工作平台上实现发射药从二维到三维结构一体化成型^[22]。将硝化棉、含能增塑剂和溶剂配制成一定粘度的浆料,采用线形直写和液滴直写相结合的方式^[23],以气压为动力,将储存于料筒的发射药浆料从喷嘴层层直写并沉积于基板形成三维实体。

在工作平台上,根据设计好的打印路径通过机头直写并沉积在指定的位置,从底部向上打印逐渐构建所设计的发射药,通过溶剂挥发使发射药在平台上逐层固化来完成设计药形的3D打印。工艺示意图如图1所示。

1.2 试剂与仪器

含氮量13.48%的硝化棉,三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN),*N*-丁基硝氧乙基硝酸胺(BuNENA),*N,N'*-二甲基-*N,N'*-二苯脲(C₂),均来自泸州北方化学工业有限公司;乙醇和丙酮,国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

离心脱泡机,常州万丰仪器制造公司;直写打印机,上海碧诺机电有限公司;密闭爆发器,泸州北方化学工业有限公司;12.7 mm机枪,泸州北方化学工业有限公司;水平天幕光电靶测速仪,西北工业大学制造。

1.3 直写打印

以NC为基体黏合剂,TMETN和BuNENA为混合增塑剂,C₂为中定剂,乙醇和丙酮的混合溶液为溶剂,配制打印浆料。

对浆料进行离心脱泡,脱泡浆料通过气压输送,螺杆泵计量后经过不同直径的针头以设计的路径完成发

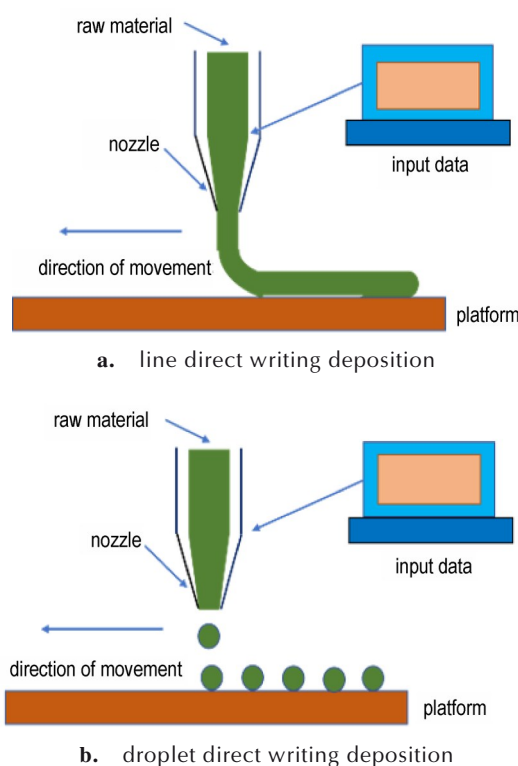


图1 线形、液滴直写沉积成型工艺原理图

Fig.1 Schematic diagram of line and droplet by direct writing deposition

射药样品的直写打印。

1.4 定容燃烧与弹道验证

采用容积为50 mL的密闭爆发器测定了内嵌多方孔发射药的燃烧性能,点火药为硝化棉,装填密度 $0.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时点火压力9.27 MPa;装填密度 $0.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时点火压力为9.81 MPa,采样时间间隔为0.01 ms,温度为25 ℃。

内嵌多方孔发射药采用12.7 mm机枪进行内弹道试验,采用水平天幕光电靶测速,预压铜柱测压。

2 结果与讨论

2.1 发射药药形设计

由几何燃烧定律^[24]可知,发射药是按表面平行层逐层燃烧的。为了研究不同药形、不同内孔结构等因素对燃面渐增性的影响,对传统药形燃气生成规律进行归纳总结,梳理提高发射药燃面渐增性的影响因素,设计了一种内嵌多方孔的发射药形,和传统圆柱7孔、19孔发射药相比,此种药形无燃烧分裂点。对传统圆柱7孔、19孔发射药,常见25方孔、64方孔发射药,新型内嵌64方孔、内嵌120方孔发射药的燃面渐增性进

行计算,药形数据见表1,其中内嵌多方孔药形结构如图2所示。以发射药相对燃烧面积(燃烧瞬时燃面/初始燃面)为纵坐标(σ),以发射药的已燃相对厚度为横坐标(Z)作图,来表示发射药燃烧过程的燃面变化规律,结果如图3所示。

表1 对比药形的形状参数

Table 1 Shape parameters of comparative propellants

propellant	a /mm	b /mm	h /mm	$r+w$ /mm	a_1 /mm	b_1 /mm	n
7 perforations	3	/	4.5	0.6	0.2	0.2	7
19 perforations	9	/	13.5	1.9	0.38	0.38	19
25 cubic pores	5.5	5.5	8.25	0.5	0.5	0.5	25
64 cubic pores	5	5	7.5	0.278	0.278	0.278	64
inner 64 cubic pores	5.56	5.56	8.06	0.556	0.278	0.278	64
inner 120 cubic pores	20	16.5	24.75	1.07	0.5	0.5	120

Note: a represents the diameter for cylindrical perforation or the length for the propellant, b represents the width for the propellant, h represents the height for the propellant, c represents the side length for the inner square hole, w represents distance between adjacent perforation for the propellant, r represents the thickness for the outer surface covering layer, n represents the total number for inner holes.

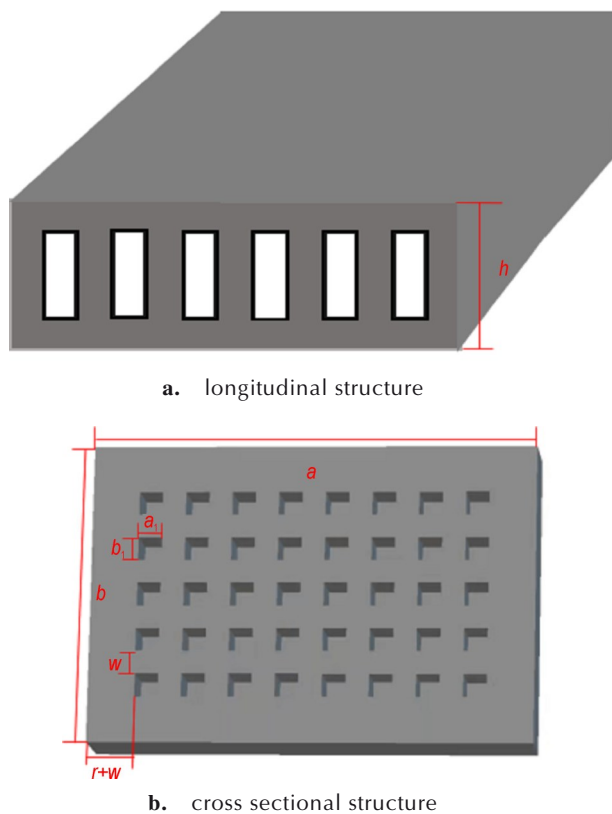


图2 内嵌多方孔发射药形纵截面和横截面结构

Fig. 2 Longitudinal and cross sectional structure of propellants embedded with cubic pores

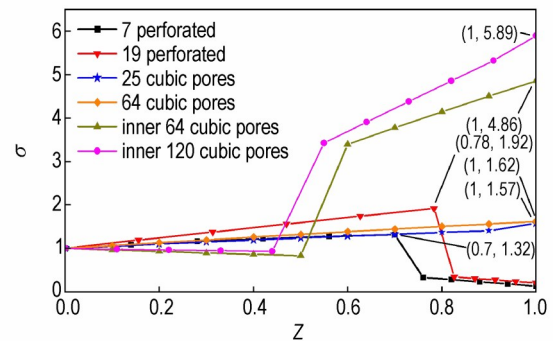


图3 不同药形燃烧表面积与已燃相对厚度变化关系

Fig. 3 Variation of combustion area of different propellants with relative thickness of burned propellants

设计内嵌多方孔发射药外形为长方体,立体长方或四方孔在药形的内部,为了保证发射药燃面渐增性同时保证整体同时燃完,内嵌方孔的边长和弧厚相同;内嵌多方孔发射药是先从外部开始燃烧,当外层封闭药层燃烧完毕瞬间进入内孔燃烧阶段,此时燃面呈跨越式增加,进入增面燃烧阶段,设计药形的纵截面和横截面示意图见图2a~2b。

图3中理论计算的圆柱多孔药形存在燃烧分裂点,在分裂点之前燃面呈渐增性燃烧,分裂点之后燃面呈减面燃烧,其中圆柱7孔药和19孔药处于分裂点时瞬时燃面相比于初始燃面分别增加了31.8%和92.7%;25方孔药、64方孔药形呈增面燃烧,燃烧结束时燃面相比于初始燃面分别增加了57.4%和62.0%;内嵌64方孔药形、内嵌120方孔药形呈两段式燃烧,前期略呈减面燃烧,在内孔被打开燃烧瞬间,进入增面燃烧阶段,燃面渐增程度跨越式增加了4.86倍和5.89倍。可见相比于传统发射药形,内嵌多方孔发射药形具有更高的燃面渐增性,且内嵌方孔越多,燃面渐增性程度越高。因而选择具有较高燃面渐增性的内嵌多方孔药形作为3D打印药形。

2.2 打印浆料配方

根据3D打印直写成型的特点,为了使3D打印发射药浆料直写于基板后仍然能够保持形状,要求物料具有合适的粘度,既要保证物料具有一定的流动性,还要保证物料具有合适的溶剂挥发速度和固化速率使物料具有一定的支撑作用来完成上层的打印,避免药形坍塌变形,因而溶剂和硝化棉的混合比例(即溶棉比)是影响3D打印发射药形的重要因素。

通过对溶棉比为1:1、1.3:1、1.5:1的浆料进行对比,发现溶棉比为1:1时,浆料粘度大、受力不均匀,流动性差,打印的线条接触处会因为溶剂挥发不均匀而

产生工艺气泡;当溶棉比为1.5:1时,浆料流动性非常好、粘度小,但是打印线条会因为流动性过大而无法维持线条的形状,导致实际打印层厚度与设计厚度发生较大偏差,乃至药形坍塌或者变形而无法支撑下一层的打印;而当溶棉比为1.3:1,物料的流动性适中,既能支撑下层的打印又具有很好的相溶性,因此选用溶棉比1.3:1制备直写打印浆料。

为了更好地溶解物料,满足3D打印机对浆料的要求,根据溶度参数理论^[25],首先选择乙醇将硝化纤维素大分子溶胀,然后加入丙酮使物料完全溶解。因而乙醇和丙酮的对比对物料有着较大影响,在溶棉比为1.3:1时,对醇酮比(质量比)为1:1(胶料

I)、1:2(胶料II)进行了对比研究。当醇酮比为1:1时,胶料I塑性较差,出口处剪切力与剪切速度不匹配导致打印出现“竹节”状线条;当醇酮比为1:2时,胶料II溶解后呈透明胶状,打印时出料顺利,线条内部均一性良好,可塑性良好,因而选择醇酮比为1:2。2种溶剂配比的打印工艺性试验结果如表2所示。结果表明,选择溶棉比为1.3:1,胶料I(醇酮比1:1)打印线条可塑性较差、不透明,这是溶剂比不合理导致的;胶料II(醇酮比1:2)流动性好,可塑性好,打印样品表面光滑,溶剂挥发速率适中,因此本研究选择胶料II配方作为打印浆料配方。表2中溶棉比为醇酮溶剂总质量与NC+TMETN+BuNENA总质量之和的比值。

表2 胶料配方及状态

Table 2 Formulation and properties of slurry

slurry	components	alcohol/ketone (m/m)	ratio of solvent/nitrocellulose	slurry properties
I	NC, TMETN, BuNENA	1:1	1.3:1	poor plasticity, opaque colloid, instable solvent volatility
II	NC, TMETN, BuNENA	1:2	1.3:1	transparent colloid, good fluidity, smooth surface

Note: *m* is the weight of the solvent.

2.3 直写打印内嵌多方孔发射药

根据直写成型3D打印技术的特点可知,直写线条的尺寸越大,设备控制精度越低,打印越容易,而为了提高燃面渐增性,需要尽可能增加发射药封闭方孔的数量。对于小口径弹药,受制于弹筒口径限制,不允许将发射药形设计过大,为了在有限的尺寸上打印更多的孔,就需要较高的控制精度。本研究采用的直写打印设备的位置精度可以达到0.02 mm,根据小口径枪弹装药腔体的尺寸和装药量,在上述燃面渐增性分析基础上,设计并打印了内嵌80方孔发射药(NC-80)和120方孔发射药(NC-120);根据小口径枪械装药弧厚薄、燃烧时间短的特点设计了2种超薄、超多方孔的内嵌686方孔发射药(NC-686)和1372方孔发射药(NC-1372)。

直写打印针头内径对药形的尺寸大小和打印的控制精度具有重要影响,本研究选用内径0.21、0.31、0.4、0.47、0.57、0.66 mm和0.78 mm的针头进行了试验,结果表明,大口径针头打印速度快但精度较差,小口径针头打印速度慢但精度较高,故将弧厚较大、孔数较少的药形采用内径为0.57 mm的针头打印,将弧厚较小、孔数较多的药形采用内径为0.31 mm的针头打印,药形的设计参数见表3,药形的实测相关参数见表4。

图4中的内嵌80方孔发射药,NC-80,是采用内径为0.57 mm针头打印6层内嵌80方孔发射药,设计

表3 内嵌多方孔药形的设计参数

Table 3 Design parameters of propellant shapes embedded with cubic pores

propellants	<i>a</i> /mm	<i>b</i> /mm	<i>h</i> /mm	<i>a</i> ₁ /mm	<i>b</i> ₁ /mm	<i>d</i> /mm	<i>n</i>
NC-80	30	6.5	3	0.5	0.5	0.57	80
NC-120	30	9.5	3	0.5	0.5	0.57	120
NC-686	35.5	9.6	1.24	0.2	0.2	0.31	686
NC-1372	35.5	20.8	1.24	0.2	0.2	0.31	1372

Note: *d* is the inside diameter of needle.

单孔尺寸为0.5 mm×0.5 mm、孔排列方式为4×20、*w*=0.50 mm,其中中间4层为打印内嵌方孔药形,外层各打印1层致密层,以保证方孔被封闭于药形内部;从图4中可知,内嵌80方孔发射药形呈透明窄长方体结构,方孔内嵌于内部;图5中的内嵌120方孔发射药,NC-120,是在相同条件下打印的6层内嵌120方孔发射药,设计单孔尺寸为0.5 mm×0.5 mm、孔排列方式为6×20、*w*=0.50 mm,打印样品表面光滑均匀,打印样品外形一致性好。

图6中的内嵌686方孔发射药,NC-686,是采用内径为0.31 mm针头打印的3层内嵌686方孔发射药,设计单孔尺寸为0.2 mm×0.2 mm、孔排列方式为14×49、*w*=0.40 mm,中间层按照设计药形包含686个小方孔,外层各打印1层致密层,打印样品内呈透明长方体结构;图7中的内嵌1372方孔发射药,

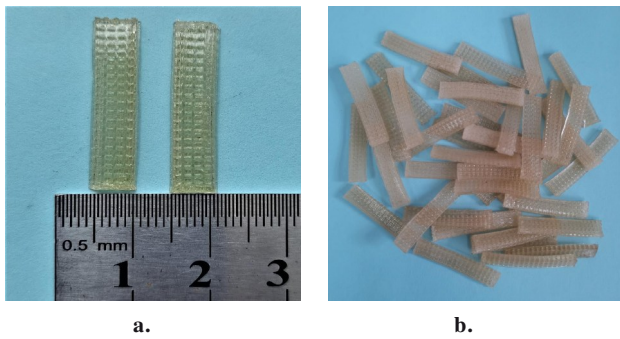


图4 NC-80打印样品实物图

Fig.4 Photos of printed NC-80 samples

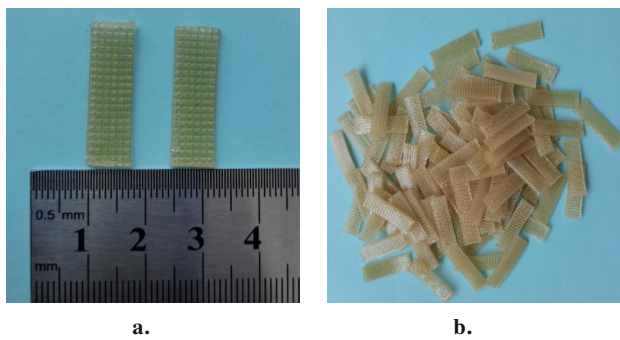


图5 NC-120打印样品实物图

Fig.5 Photos of printed NC-120 samples

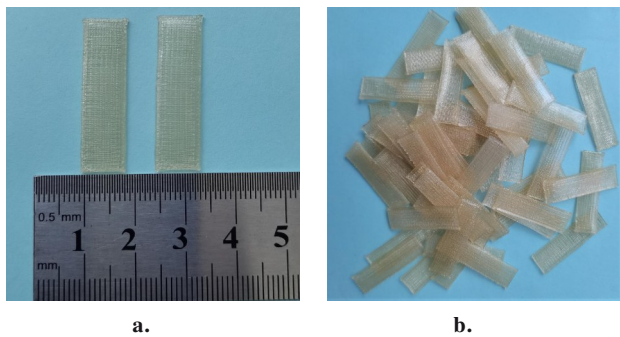


图6 NC-686打印样品实物图

Fig.6 Photos of printed NC-686 samples

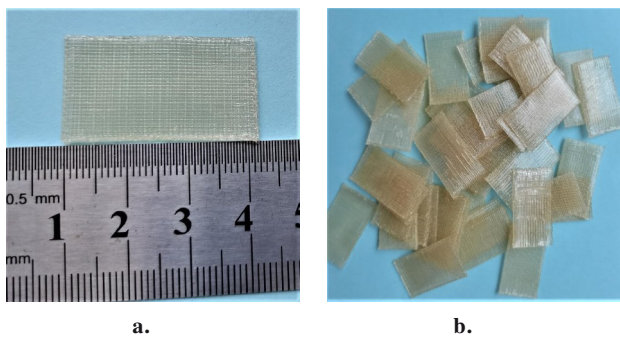


图7 NC-1372打印样品实物图

Fig.7 Photos of printed NC-1372 samples

NC-1372,是在相同条件下打印的3层内嵌1372方孔发射药,中间层按照设计药形包含1372个小方孔,设计单孔尺寸为0.2 mm×0.2 mm、孔排列方式为28×49、 $w=0.40$ mm,外层各打印一层致密层,打印样品内呈透明长方体结构;2种打印样品的药形一致性较好。

2.4 打印样品形状特征量

为了考察直写打印技术实际制备式样尺寸与设计尺寸是否相符,对3D打印内嵌多方孔发射药NC-80、NC-120、NC-686、NC-1372的实体药形尺寸进行测量;对4种药形NC-80、NC-120、NC-686、NC-1372样品的质量进行称量,并根据药形尺寸和质量计算得到宏观体密度,相应数据见表4。

表4 药形实际参数

Table 4 Actual parameters of propellant shape

propellants	a /mm	b /mm	h /mm	a_1 /mm	b_1 /mm	n	w /mm	m /g	ρ /g·cm ⁻³
NC-80	27.8	5.8	1.8	0.8	0.8	80	0.4	0.25	0.86
NC-120	27.8	7.8	1.8	0.8	0.8	120	0.4	0.4	1.02
NC-686	32	8.8	0.7	0.3	0.3	686	0.25	0.3	1.52
NC-1372	32	18	0.7	0.3	0.3	1372	0.25	0.5	1.24

Note: m is individual propellant weigh; w is web (distance between adjacent perforation); ρ is bulk density.

由表4中数据可以看出,实测药形数据相比设计药形有所减小,NC-80和NC-120内孔尺寸从0.5 mm增加到了0.8 mm,NC-686和NC-1372内孔尺寸从0.2 mm增大到了0.3 mm,这是由于样品内溶剂挥发,药形收缩,尺寸减小,药形内部样品线条收缩,方孔尺寸增大;同种浆料打印的4种药形样品的质量和体积密度不同,其原因是随着药形不同、溶剂挥发程度不同、药形收缩不同而有所差别。

2.5 打印样品定容燃烧性能

受打印药量限制,本研究选用NC-1372和将NC-80、NC-1372进行1:1混合装药的NC-80/NC-1372(1/1)打印样品进行定容燃烧和内弹道性能考察。测出NC-1372和NC-80/NC-1372(1/1)内嵌多方孔发射药的 $p-t$ 曲线,并对其直接进行微分求得 $dp/dt-p$ 曲线,通过公式(1)、(2)得到动态活度 $L-B$ 曲线, $p-t$ 曲线和 $L-B$ 曲线分别如图8所示,相应的密闭爆发器测试结果见表5。

$$L = \frac{d p / d t}{\rho_i \rho_{\max}} \quad (1)$$

$$B = \frac{p_i}{\rho_{\max}} \quad (2)$$

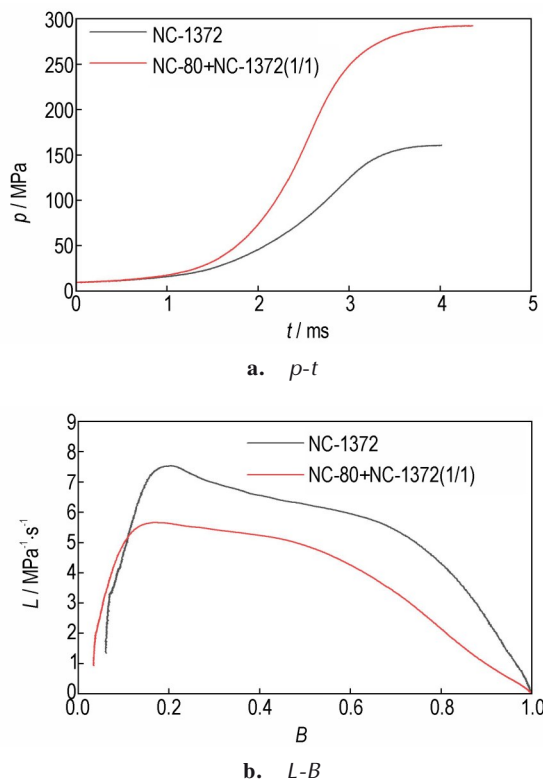


图8 NC-1372、NC-80/NC-1372(1/1)的 $p-t$ 和 $L-B$ 曲线

Fig.8 $p-t$ and $L-B$ curves of NC-1372 and NC-80/NC-1372 (1/1)

表5 密闭爆发器测试结果

Table 5 Test results of closed bomb vessel

propellants	t/ms	p_{\max}/MPa	$\Delta/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$L/\text{MPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
NC-1372	3.96	161.3	0.12	6.40
NC-80/NC-1372 (1/1)	4.19	292.7	0.2	4.81

Note: t is the time when the combustion reaches its maximum pressure; p_{\max} is maximum pressure; Δ is the loading density.

式中, p_{\max} 为测试时的最大压力, MPa; p_i 为不同时间点的压力值, MPa; $L-B$ 曲线反映发射药燃面渐增性的变化趋势^[26]。

由图 8a 中的 $p-t$ 曲线可以看出, NC-1372 达到最大压力时间约为 3.96 ms, 燃烧时间短, 符合小弧厚发射药的燃烧特点; 当 NC-1372 与 NC-80 按照 1:1 混合后, 达到最大压力燃烧时间延长到 4.19 ms, 这是由于 NC-80 的弧厚为 0.4 mm, NC-1372 的弧厚为 0.25 mm, NC-80 的弧厚比 NC-1372 的弧厚大, 故而达到最大压力燃烧时间变长。

图 8b 为 NC-1372、NC-80/NC-1372 (1/1) 的 $L-B$ 曲线, 从图 8b 中可知, NC-1372、NC-80/NC-1372 (1/1) 药形具有明显的燃面渐增性, 同时 NC-1372 的动态活

度明显高于 NC-80/NC-1372 (1/1) 混合装药, 这是由于 NC-1372 的弧厚小、燃气生成速率更快, 而从 $B=0.2$ 以前的 L 值快速升高表明设计药形在内孔被打开瞬间燃面突然增大, 但另一方面又说明外层厚度设计不合理, 内孔打开时间过早, 今后需要根据渐增性要求优化外层厚度设计。

2.6 打印样品 12.7 mm 机枪试验

为了考察打印发射药的膛内燃烧特性和内弹道性能, 采用 12.7 mm 机枪弹为试验平台, 以直写打印的 6 层内嵌方孔发射药 NC-120 和制式 D-4/7 混合装药进行装药试验, 依据表 6 的装药比例制得 5 个样品, 试验结果见表 6。

表6 内弹道测试数据

Table 6 Test data of internal ballistics

samples	D-4/7 / g	NC-120 / g	$\omega / \%$	p / MPa	$v / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1 [#]	0	10	0:10	272.3	680.8
2 [#]	6	6	1:1	272.3	726.1
3 [#]	6	8	3:4	/	679.2
4 [#]	8	8	1:1	314.2	854.1
5 [#]	16	0	16:0	320	850

Note: ω is the mass ratio of D-4/7 and NC-120; p is the chamber pressure; v is initial velocity of the bullet.

由表 6 可知, 5[#] 是制式 D-4/7 标准装药量 (16 g) 下, 测得膛压为 320 MPa, 初速为 $850 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 4[#] 是当 NC-120 发射药和制式 D-4/7 混合装药比例为 1:1、装药量 16 g 时, 测得膛压为 314.2 MPa, 射击初速为 $854.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 和制式装药 5[#] 相比膛压稍低、初速稍高。上述结果初步说明, 直写打印的硝化棉基内嵌多方孔发射药的膛压和初速虽达到与制式发射药相似的水平, 但打印内嵌多方孔发射药药形、内外层弧厚匹配等对燃面渐增性和内弹道性能影响很大, 需要系统深入研究。

3 结论

(1) 直写 3D 打印为制备具有较高燃面渐增性的复杂发射药形提供了一种方法。

(2) 硝化棉、含能增塑剂和溶剂配制的浆料可以采用直写成型 3D 打印技术制备复杂形状发射药, 打印针头直径、溶棉比、醇酮比、溶剂挥发速度等因素对打印发射药药形及尺寸影响较大。

(3) 直写打印的硝化棉基内嵌多方孔结构在内孔

打开瞬间可有效提高发射药的燃面渐增性,同时在NC-120发射药和制式D-4/7混合装药比例为1:1、装药量16 g时,膛压为314.2 MPa,射击初速为854.1 m·s⁻¹,达到了制式发射药相似的水平,具有较高的应用潜力和发展前景。

(4)对内嵌多方孔发射药的药形、内外层弧厚匹配等参数进行优化可以进一步提高发射药的燃面渐增性和内弹道性能。

参考文献:

- [1] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-46.
JIN Zhi-ming. Interior ballistic of gun propellant[M]. Beijing: Beijing Institute of technology Press, 2004: 19-46.
- [2] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
WANG Ze-shan. Introduction to energetic materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
- [3] 王泽山. 控制发射装药燃气生成规律的一种方法[J]. 中北大学学报, 2001, 22(4): 252-255.
WANG Ze-shan. A method of propellant charge technique to control the gas generate[J]. *Journal of North University of China*, 2001, 22(4): 252-255.
- [4] 王泽山. 发射药技术的展望[J]. 华北工学院学报, 2001(增刊): 36-40.
WANG Ze-shan. Development and prospect of propellant techniques [J]. *Chinese Journal of North University of China (Suppl.)*, 2001: 36-40.
- [5] 肖忠良, 梁昊. 关于低敏感发射药与装药技术的思考与建议[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 894-896.
XIAO Zhong-liang, LIANG Hao. Thoughts and suggestions on insensitive propellant and charge technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 894-896.
- [6] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
LU Bing-hen, LI Di-chen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
- [7] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏观结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.
LI Di-chen, HE Jian-kang, TIAN Xiao-yong, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [8] 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.
- [9] HOU YL, ZHAO T T, LI C H, Ding Y C. The manufacturing of rapid tooling by stereo lithography[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 102: 578-582.
- [10] 张洪林, 刘宝民, 马新安, 等. 基于3D打印技术的发射药燃烧增面设计[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 491-496.
ZHANG Hong-lin, LIU Bao-min Ma Xin-an, et al. Design of propellant combustion surface increment based on 3D printing technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 491-496.
- [11] 周梦蕾, 南风强, 何卫东, 等. 基于挤出沉积技术的发射药3D打印机设计及制备[J]. 含能材料, 2021, 29(6): 530-534.
ZHOU Meng-lei, NAN Feng-qiang, HE Wei-dong, et al. Design and fabrication of propellant 3D printing based on Extrusion deposition Technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(6): 530-534.
- [12] 苏醒, 那青, 党丽, 等. 增材制造技术在含能材料领域中的应用[J]. 新技术新工艺, 2020, 12(6): 26-30.
SU Xing, NA Qing, DANG Li, et al. Application of additive manufacturing technology in energetic materials [J]. *New Technology and New Process*, 2020, 12(6): 26-30.
- [13] YANG Wei-tao, HU Rui, LIN Zheng, et al. Fabrication and investigation of 3D-printed gun propellants[J]. *Materials and Design*, 2020, 92: 108761.
- [14] 杨伟涛, 肖霞, 胡睿, 等. 增材制造技术在火炸药成型中的研究进展[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 1-11.
YANG Wei-tao, XIAO Xia, HU Rui, et al. Research progress of additive manufacturing technology in explosive forming[J]. *Chinese Journal of Explosives & Explosives*, 2020, 43(1): 1-11.
- [15] 肖磊, 王庆华, 李万辉, 等. 基于三维打印技术的纳米奥克托今与梯恩梯熔铸炸药制备及性能研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1291-1298.
XIAO Lei, WANG Qing-hua, LI Wang-hui, et al. Preparation and properties of nano-octogen and TNT fusion casting explosives based on 3D printing technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(7): 1291-1298.
- [16] DUDEK P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, 58(4): 1415-1418.
- [17] MEI J, LOVELL M R, MICKLE M H. Formulation and processing of novel conductive solution Inks in continuous inkjet printing of 3-D electric circuits[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2005, 28(3): 265-273.
- [18] HON K K B, LI L, HUTCHINGS I M. Direct writing technology-advances and developments[J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2008, 57(2): 601-620.
- [19] 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 write explosive ink[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 235-238.
- [20] 宋长坤. CL-20基炸药油墨设计及微笔直写成型技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
SONG Chang-kun, Design of CL-20 based explosive ink and micro-write-through molding technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [21] BRAIN E F, AMY W, PAULA C, et al. Development performance and use of direct write explosive inks[C]//14th International Detonation Symposium, Coeur d'Alene: Idaho, 2010.
- [22] 马明. 气动挤出金属直写沉积成形技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
MA Ming. Research on direct writing deposition forming technology of pneumatic extrusion metal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [23] 孙月花, 彭超群, 王小锋, 等. 直写成型技术: 一种新型微纳尺

- 度三维结构的制备方法[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1525-1537.
- SUN Yue-hua, PENG Chao-qun, WANG Xiao-feng, et al. Direct writing forming technology: A novel fabrication method of micro/nano 3D Structure[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(6): 1525-1537.
- [24] 王泽山, 何卫东, 徐复铭. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Theory and technology of propellant charge design [M]. Beijing: Beijing Institute of technology Press, 2006.
- [25] 张端庆. 火药用原材料性能与制备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- ZHANG Duan-qing. Properties and preparation of raw materials for gunpowder[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [26] 王琼林, 赵小锋, 刘少武, 等. 一种基于密闭爆发器试验的发射药燃烧渐增性定量评价方法[J]. 火炸药学报. 2009, 32(3): 71-74.
- WANG Qiong-lin, ZHAO Xiao-feng, LIU Shao-wu, et al. A quantitative evaluation method for cumulative combustion of propellant based on closed explosive test[J]. *Chinese Journal of Explosives & Explosives*, 2009, 32(3): 71-74.

Direct Ink Writing and Properties of Nitrocellulose-based Gun Propellants Embedded with Multi-cubic Pores

FAN Wen-rui¹, XIONG Peng², SONG Yu-fang¹, XIAO Le-qin¹, ZHAO Qi-lin², LI Chun-zhi², ZHOU Wei-liang¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Luzhou North Chemical Industries Co. Ltd, Luzhou 646605, China)

Abstract: In order to solve the dilemma of traditional technology to prepare gun propellants with complex structure and explore a new way to improve incremental combustion surface of gun propellants, 3D direct ink-writing was used to design and print nitrocellulose-based gun propellants embedded with multi-cubic pores. The 3D printed nitrocellulose-based gun propellants embedded with multi-cubic pores were characterized by constant volume combustion and internal ballistic properties. The results show that the printed nitrocellulose-based gun propellants embedded with multi-cubic pores, prepared by nitrocellulose, energetic plasticizer, and solvent as printing materials, are in accordance with the expected design of incremental combustion surface. Due to the influence of the diameter of printing needle, the ratio of dissolved cotton, the ratio of alcohol/acetone, and the speed of solvent volatilization, there is a certain deviation between design size and actual size of printed gun propellants. The preliminary ballistic test of 12.7 mm machine gun shows that when the mixed charge of NC-120 and D-4/7 is 16 g and the charge ratio is 1:1, the bore pressure is 314.2 MPa and the muzzle velocity is 854.1 m·s⁻¹. The stable and normal combustion of the direct ink-writing printed gun propellants embedded with multi-cubic pores in the chamber is realized. However, for the sake of practical application of printed gun propellants embedded with multi-cubic pores, several parameters need to be further optimized such as shape, web size, and the web size matching between inner and outer layer.

Key words: direct ink writing; gun propellant; combustion performance; ballistic properties

CLC number: TJ411

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022007

(责编: 王馨逸)