

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.04.001

# 3D 打印技术在火工品和炸药中的应用研究<sup>\*</sup>

董  军<sup>①②</sup>  杜茂华<sup>①</sup>  王晓峰<sup>②</sup>  王伟力<sup>①</sup>  谭  波<sup>①</sup>  邢江涛<sup>①</sup>  姚天乐<sup>①</sup>  黄亚峰<sup>②</sup>  杨  雄<sup>②</sup>

①海军工程大学(湖北武汉,430033)

②西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘  要]  围绕3D打印技术在火工品装药和炸药装药两个领域的国内外研究情况进行述评,内容涉及3D打印技术在火工品和炸药中的研究进展、3D打印技术在炸药装药领域中的应用分析等方面。结果表明,3D打印技术具有便于实现复杂结构装药、无需传统模具、小批量试制成本低、载质量小、本质安全性高等特点。所以,3D打印技术在火工品装药和炸药装药领域具有一定的应用价值,也是这两个领域今后重点发展的方向之一。

[关键词]  兵器科学与技术;3D打印;增材制造;炸药;火工品

[分类号]  TJ55

## Application of 3D Printing Technology in Pyrotechnics and Explosives

DONG Jun<sup>①②</sup>, DU Maohua<sup>①</sup>, WANG Xiaofeng<sup>②</sup>, WANG Weili<sup>①</sup>, TAN Bo<sup>①</sup>, XING Jiangtao<sup>①</sup>,  
YAO Tianle<sup>①</sup>, HUANG Yafeng<sup>②</sup>, YANG Xiong<sup>②</sup>

① Naval University of Engineering (Hubei Wuhan, 430033)

② Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT]  Research situation of 3D printing technology in pyrotechnics charge and explosive charge at home and abroad, including research progress of 3D printing technology in pyrotechnics and explosive ink, and the application analysis of 3D printing technology in explosive charge field, was reviewed. Results show that 3D printing technology has the characteristics of easy to realize complex structure charge, no need of traditional mold, low cost of small batch trial production, small load mass and high intrinsic safety. As a result, 3D printing technology has a certain application value in the field of pyrotechnics charge and explosive charge, which is also one of the key development directions of these two fields in the future.

[KEYWORDS]  ordnance science and technology; 3D printing; additive manufacture; explosive; pyrotechnics

## 引言

3D 打印技术(3D printing technology)也称增材制造(additive manufacturing, AM),自问世以来就成为了科技界关注的焦点,并被广大学者和机构称为第3次工业革命和野蛮神器。美国和中国都将该技术列为国家战略规划之一,并大力发展。在国防工业中,3D打印技术在兴起之初就受到航空、航天、兵器、船舶等研究领域的重视<sup>[1-4]</sup>。2013年,全球首支纯3D打印手枪在美国问世,更加激起国防工业制造领域对3D打印技术的研究热潮。

炸药装药生产作为军工(弹药)制造业的重要组成部分,是连接炸药和战斗部(或弹丸)之间研制和生产的桥梁,其重要性不言而喻。如果将3D打印技术应用到炸药装药的研究和生产中,可以轻松实现异形结构弹丸装药,使弹药产品不再因装药结构复杂而难以实现工业化制造。对此,国内外学者和相关研究机构首先开展了3D打印技术在微小尺寸火工品装药领域的应用研究,并在微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)的复杂精密装药中进行了应用。但是对于大尺寸炸药装药产品而言,如果要采用3D打印技术进行炸药装药,目前仍然需要解决3D打印设备放大、炸药配方与喷

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-09-05

第一作者:董军(1982-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事高能炸药及装药技术研究。E-mail:94180853@qq.com

通信作者:王晓峰(1967-),男,博士,研究员,主要从事混合炸药技术研究。E-mail:wangxf\_204@163.com

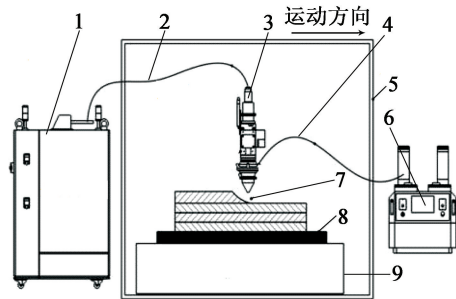
嘴的匹配性、装药工艺适应性、装药过程安全、质量、效率等一系列问题,这些都制约了 3D 打印技术在炸药领域的应用。

在标准组织 ASTM International 的定义中,3D 打印和增材制造两个术语是等同的;但是在特指装置或设备时,3D 打印是指总体功能简单的增材制造设备。在应用层面上,以研究工作为目的使用的增材制造技术称为 3D 打印;以产品生产或试制为目的的使用,则称为增材制造。

本文中,主要围绕增材制造技术在火工品和炸药领域中的应用研究情况进行述评,因此使用了 3D 打印这个技术名词。

## 1 3D 打印技术在炸药油墨中的研究

采用 3D 打印技术进行装药的火工品通常被形象地称为炸药油墨。炸药油墨以含能材料为主要成分,通过与黏结剂和溶剂混合,形成溶液或悬浮液,采用 3D 打印装置以直写的形式实现材料的逐层堆积。图 1 展示了典型的光固化 3D 打印机的组成和工作原理。油墨材料储存在物料器中,通过泵和管道输送到喷嘴,在工作台的基材上进行逐层叠加喷涂,在喷涂的同时由光固化器提供特定光进行照射,固化成型。因此,研制出合适的炸药油墨是实现 3D 打印技术在火工品装药行业应用的前提。



1 - 光固化器;2 - 光纤;3 - 喷头;4 - 物料传输;5 - 气氛保护室;6 - 物料器;7 - 打印面;8 - 基材;9 - 工作台。

图 1 光固化 3D 打印机原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of UV curing 3D printer

由于炸药油墨采用直写平台装填,满足小尺寸器件装药要求,所以早期主要用于 MEMS 火工品及军用传感器中<sup>[5-6]</sup>。为了保证小尺寸炸药油墨稳定爆轰,配方主炸药组分一般选用能量密度更高的六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20)<sup>[7]</sup>来取代黑索今 (RDX) 和奥克托今 (HMX)。因此,国内外学者也主要围绕适用于 MEMS 组件 3D 打印装药用 CL-20 基

炸药油墨开展了大量的研究工作。

### 1.1 国外炸药油墨研究

2010 年,美国首先报道了一种 CL-20 基炸药油墨。采用 3D 打印装置以直写形式在 MEMS 组件中开展了装药应用,利用 CL-20 自身能量密度高和爆轰稳定的特点,实现了微量炸药的精确装药及正常起爆传爆,并且通过了美军传爆药资格认证<sup>[6]</sup>,验证了 3D 打印炸药油墨在微小尺寸精密组件中装药的技术可行性。Ihnen 等<sup>[8-10]</sup>利用喷墨打印机对 RDX 基和太安 (PETN) 基全溶性炸药油墨在打印过程中的成型机理进行了研究;由于炸药颗粒在不同喷墨工艺条件下析出的晶体形貌发生变化,因而对应的装药密度也不尽相同,所以在设计全溶型炸药油墨时,要考虑炸药析出后晶体形貌变化对装药密度产生的影响。除此之外,国外还研制出了含硼的环境友好型炸药油墨和含氟聚合物的炸药油墨<sup>[11-12]</sup>。这些炸药油墨主要用在火工品组件上,借鉴了亚稳态分子间复合物结构的设计思想,采用惰性组分将氧化剂和还原剂分别包覆后混合在一起,再进行 3D 打印,成型后的氧化剂和还原剂紧密排列组合在一起,提高了组分在点火后的反应完全性。

### 1.2 国内炸药油墨研究

国内有关研究也发现,采用 3D 打印可以实现炸药油墨在 MEMS 组件上精密装药<sup>[13-20]</sup>。沿着这一应用方向,开展了关于 3D 打印用炸药油墨设计和成型的研究工作。表 1 为国内几种炸药油墨的研究情况。

2010 年,邢宗仁<sup>[21]</sup>配制出了斯蒂芬酸铅/紫外光固化树脂和斯蒂芬酸铅/硝化棉两种炸药油墨,并在 MEMS 微推进芯片中进行了装药对比研究,发现黏结剂体系对炸药油墨的装药质量和应用性能产生影响。徐传豪等<sup>[22]</sup>采用 CL-20、乙基纤维素和聚叠氮类黏结剂制备出了 CL-20 基油墨炸药,并利用 3D 打印装置将其直写到基板上;通过测试发现,炸药油墨的装药密度仅为理论装药密度的 85%,在惰性组分作用下,炸药中 CL-20 的机械感度有所降低;但是 DSC 和 XRD 测试发现,装药后的 CL-20 发生了转晶,使得炸药油墨的热安定性变差。选用高分子量聚合物作为黏结剂可以提高炸药的力学性能,但是也增加了炸药油墨的黏度。虽然采用提高工艺温度的手段可改善炸药油墨的流动性,但是 CL-20 在高温下发生了转晶现象<sup>[23]</sup>,降低了成型后炸药的热安定性。因此,在设计炸药油墨时,要考虑成型工艺条件对主炸药 (尤其是 CL-20) 性能的影响。在此之后,宋长坤<sup>[24]</sup>设计了适用于微笔直写型装药工艺的

表 1 国内炸药油墨研究情况

Tab. 1 Research status of explosive ink in China		
类型	配方组成	应用情况
CL-20 基炸药油墨	CL-20、斯蒂芬酸铅、紫外光固化树脂	在 MEMS 微推进芯片中进行装药
	CL-20、斯蒂芬酸铅、硝化棉	
	CL-20、乙基纤维素、聚叠氮类黏结剂	用 3D 打印装置将其直写到基板上
	CL-20、水性聚氨酯、乙基纤维素、烷基芳基聚醚	适用于微笔直写型装药工艺
	CL-20、聚乙烯醇、F26 型氟橡胶	能够稳定传爆并起爆 PBXN-5 装药
HMX 基炸药油墨	HMX、聚氨酯、Span80	流变性可调的炸药油墨
	HMX、聚氨酯、Tween80	
RDX 基炸药油墨	RDX、光固化树脂	光固化炸药油墨
纳米铝热剂油墨	铝热剂、树脂	树脂基纳米铝热剂油墨

CL-20 基炸药油墨,采用水性聚氨酯和乙基纤维素为双组分黏结剂,选用水性防沉剂 410(烷基芳基聚醚)作添加剂,可使油墨体系保持长期稳定,并且装药后的 CL-20 固体质量分数达到了 90%。该炸药油墨配方解决了 CL-20 在油墨溶液和装药过程易发生转晶的问题,改善了炸药的热稳定性;但是,为了降低体系黏度,设计的配方中含有大量溶液组分,影响了成型后的装药密度。对此,李千兵<sup>[25]</sup>采用聚乙烯醇水溶液为水相、F26 型氟橡胶的乙酸乙酯溶液为油相,设计了乳液型黏结剂体系的 CL-20 基炸药油墨,并开展了基础应用研究;经过 3D 打印后,直写成型的样品表面平整,内部无明显孔隙,CL-20 也未发生转晶现象,样品爆轰性能测试表明:在微尺度装药条件下就能够稳定传爆并起爆下级 PBXN-5 装药。虽然该炸药油墨配方具有一定的应用价值,但是还需要结合具体的 MEMS 组件开展进一步的应用研究。由此可见,在设计 CL-20 基炸药油墨时,喷墨工艺温度、选用的黏结剂和溶剂的类型和用量等因素都会对装药质量产生影响。

作为综合性能良好的硝铵类单质炸药,HMX、RDX 是除 CL-20 之外用于炸药油墨配方的主要含能材料。徐传豪等<sup>[26]</sup>设计了以聚氨酯为黏结剂的 HMX 基炸药油墨,并研究了 Span80 和 Tween80 两种非离子表面活性剂 HLB 值对其流变性能的影响,掌握了最佳 HLB 值条件下该炸药油墨的流变性能,探索了一条采用表面活性剂调节炸药油墨流变性能的途径。王景龙<sup>[27]</sup>将光固化树脂和细化后的 RDX

颗粒按照质量比 3 : 7 进行混合,制备出了光固化炸药油墨,并使用 3D 运动平台和紫外光固化光源组装 3DP 打印机,对 MEMS 组件进行了微孔自动装药。该研究验证了 3DP 光固化炸药油墨快速成型装药的可行性;但是,由于配方中含有大量的惰性组分,导致装药后的药条难以点燃。张晓婷<sup>[28]</sup>制备了树脂基纳米铝热剂油墨,并在基底上打印出了形膜;对纳米铝热剂膜进行 DSC 测试,计算出其活化能约为 186.92 kJ/mol;点火实验发现,纳米铝热剂膜虽然能够燃烧、但是并不连续;电爆实验发现,只有在有约束条件下纳米铝热剂膜才能被点燃。可见,在油墨配方中引入纳米材料后,不但要考虑 3D 打印工艺的适应性,还要研究成型后组分的均匀性,这些都会影响装药组件的进一步使用。

2 3D 打印技术在炸药中的研究

2.1 国外 3D 打印技术在炸药中的研究

作为炸药装药领域的前瞻性工艺技术,3D 打印利用计算机辅助设计和控制,能够快速、精密地制备常规和特殊结构的炸药装药样品,具有设计灵活、按需打印、研发周期短等特点。表 2 为国外 3D 打印技术在炸药中的应用情况。

表 2 国外 3D 打印技术在炸药中的应用情况			
Tab. 2 Application of 3D printing technology in explosives aboard			
国家	研究机构	研究内容	效果
美国	国防高级研究计划局(DARPA)	火工品部件传爆序列的装药	带动了先进制造创新等研究课题立项
	海军陆战队下一代后勤办公室	3D 打印手雷	试验毁伤效果优于传统制造工艺
	海军水面作战中心	能量密度梯变的 PBX 炸药	通过装药结构来控制爆炸能量输出规律
	普度大学	双喷嘴喷墨控制装置	实现了纳米铝热剂油墨装药
英国	英国国防部英国国防科学技术实验室(DSTL)	复杂装药结构的样品	实现了个性化定制化的爆炸效果

美国国防高级研究计划局(DARPA)从 1999 年就开始发展炸药的 3D 打印技术<sup>[29]</sup>,主要研究采用 3D 打印技术实现对火工品部件传爆序列的装药。随后,美国军方又先后立项了先进制造创新、先进含能材料研究等项目<sup>[30]</sup>,并于 2016 年由美国海军陆



战队下一代后勤办公室在美国马里兰州 Indian Head 海军水面作战中心试验了 3D 打印弹药如图 2 所示。



(a) 喷头装置 (b) 手雷

图 2 美国海军陆战队 3D 打印异形弹药

Fig.2 3D printing special ammunition by  
US Marine Corps

由图 2(a) 可见:3D 打印喷头装置安装在可横向运动的滑轨上;同时,该横向运动滑轨又安装在可纵向运动滑轨上;实现了喷头装置在打印平台上全覆盖运动。图 2(b) 的手雷即是在该平台上打印出来的。这种弹药制造过程较传统制造工艺更为安全;由于制造精度高,其毁伤效果也超过了传统工艺制造的弹药,如图 3 所示。



(a) 固定 3D 打印弹药 (b) 弹药起爆



(c) 对钢板的毁伤效果

图 3 美国海军陆战队在铁板上固定

3D 打印制造出来的小型炸弹及其毁伤效果

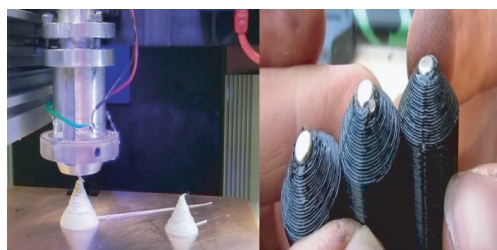
Fig.3 Small bomb made by US Marine Corps by fixing  
3D printing on iron plate and its damage effect

美国海军水面作战中心采用单喷嘴挤注打印技术依次打印出多种配方的炸药<sup>[31]</sup>,制备出能量密度梯变的 PBX 炸药,目的是希望通过装药结构来控制爆炸能量输出规律。普度大学设计出了双喷嘴喷墨控制装置<sup>[32]</sup>。该装置具有高精密的移动装药基体

承载平台和微升级喷墨控制喷嘴,通过控制平台移动和喷嘴交替喷墨实现了纳米铝热剂油墨装药。

英国在 2020 年 3 月 18 日对外展示了采用 3D 打印技术研制的弹药样品,通过设计特定的形状,实现了个性定制化的爆炸效果<sup>[33]</sup>。由英国国防部赞助英国国防科学技术实验室(DSTL),开始批量制造 3D 打印炸药。该项目旨在通过 3D 打印技术完成复杂的结构装药,从而实现控制爆炸输出规律和定制毁伤效果。

图 4 所展示英国制造出来的 3D 打印炸药样品的装药尺寸依然较小,原因无外乎是受制于打印设备平台和与之相匹配的炸药配方这两大方面。



(a) 3D 打印炸药成型 (b) 3D 打印炸药样品

图 4 英国批量制造的 3D 打印炸药

Fig.4 3D printing explosives mass produced in UK

## 2.2 国内 3D 打印技术在炸药中的研究

与国外研究几乎同步,国内相关高校和研究院所也组建了专门从事含能材料 3D 打印技术的研究团队。肖磊等<sup>[34]</sup>针对熔铸工艺进行 TNT 基炸药装药时药柱存在缺陷多、密度低、力学性能差等问题,采用 3D 打印技术进行 HMX/TNT 炸药装药,制备出了直径和高度均为 20 mm 的炸药药柱;通过与同尺寸熔铸工艺药柱对比发现,3D 打印的炸药药柱在密度、抗压强度和爆速等方面性能更优。方健等<sup>[35]</sup>为了解决传统 PBX 炸药装药耗时长、过程复杂、影响因素多、异型产品成型困难等问题,采用建模加仿真分析的方法,对 3D 打印的喷射过程进行了研究,给出了喷嘴直径、撞针行程和驱动压力的研究建议,为 3D 打印 PBX 炸药装药工艺设计提供了参考。黄璠等<sup>[36]</sup>利用 3D 打印技术设计并制造出了由 TATB 和 CL-20 两种炸药体系构筑的 3 种复合装药结构的药柱,验证了 3D 打印技术适用于复杂结构炸药装药;并且通过特殊的装药结构改善了 CL-20 炸药药柱的机械感度;但由于所用的打印针头口径很小,打印速度受限,所以并不适用于大尺寸战斗部炸药装药。此外,沈阳理工大学、西安近代化学研究所、北京理工大学、中国北方化学工业集团有限公司等单位也分别在 3D 打印系统控制、炸药配方、3D 打印工艺

等方面提出了应用设想,并开展了相关实验。

掌握大尺寸炸药装药 3D 打印成型技术,能够加快 3D 打印技术在炸药装药领域中的推广应用。南京理工大学和西安近代化学研究所分别开展了大尺寸推进剂药柱装药实验<sup>[37]</sup>,制造出了具有复杂内腔结构的推进剂药柱样品。由于推进剂和炸药的物料状态相近,因此也从侧面验证了 3D 打印技术在大尺寸炸药装药中应用的可行性。其中,推进剂配方中含有的硝酸酯类、叠氮类等组分在高温下容易发生分解,因此成型工艺对温度较为敏感。对此,南京理工大学研发了光固化推进剂 3D 打印成型技术,并注册申请了专利保护<sup>[38]</sup>,采用该技术能够实现推进剂在较低温度和压力下成型,提高了推进剂 3D 打印的安全性。为了改善推进剂药柱的力学性能,蔺向阳等<sup>[39]</sup>将成型平台设计成圆筒外表,这样制造出的推进剂药柱在轴向和径向上的力学性能得到大幅提高,满足了发动机对装药的力学性能要求。

### 3 应用于炸药领域的优势分析

与传统的炸药成型(压装成型、熔铸成型和浇注固化成型等)工艺<sup>[40-41]</sup>相比,3D 打印技术采用计算机设计制作样品模型,通过喷嘴控制物料在平面上逐层增加完成样品制造,这种制造方式不再受装药形状影响,可以完成现有制造条件难以或无法实现的装药任务。例如,带填充或拓扑优化设计的空心药柱加工,以及各种形状和结构复杂的装药。此外,不论是与传统成型工艺相比,还是与等静压<sup>[42]</sup>和双螺杆成型工艺<sup>[43]</sup>相比,3D 打印过程不再需要设计和加工大量辅助装药的工装模具,使得这种先进装药技术更适合单件科研样机研制或小批量样品试制,与传统加工方式相比,新产品的开发周期更短,成本更低,制造过程也更加安全可靠。

3D 打印技术实现了炸药一次性成型,不再需要二次加工处理,使得制造过程中原材料浪费和废料产生都很少,具有清洁制造和绿色制造的特点。此外,在计算机控制下,装药过程无人工参与,使战斗部装药的精度和质量一致性得到了进一步提高。如果能够工业化应用,将会促进炸药装药工艺实现自动化、无人化、清洁化发展,改善员工工作环境,提高生产过程的本质安全性。

3D 打印技术能够通过控制打印喷嘴实现炸药逐层增材,如果加入 3D 打印设备的炸药物料均匀一致,打印成型后的炸药样品内部组分能仍然保持均匀,这种状态有利于炸药爆炸和能量释放,并且成

型后的药柱使用安全性能更佳。对于固含量较高的炸药配方,需要设定好与材料物性相匹配的打印温度、打印速率、打印环境等工艺条件,使获得的药柱质量能够满足使用要求。

由此可见,3D 打印技术能与传统装药工艺形成互补,今后还可以借助互联网技术将增材制造的设计模型进行跨区域传输和异地加工生产,加快了炸药制造向信息化和数字化转型。

### 4 结论与展望

3D 打印技术在材料成型工艺中应用优势显著。所以,国内外学者通过大量研究,已将 3D 打印技术应用到火工品和炸药领域,但是距离工业化应用还存在一定差距。对于火工品而言,研发适用于低温打印工艺的低黏度油墨配方是其今后的主要研究方向之一;对于炸药领域,3D 打印技术仍然处于起步阶段,今后要开展大尺寸药柱的 3D 打印技术研究,逐步解决喷嘴对现有含能材料规格粒度的适应性问题,并且研建柔性化 3D 打印平台,满足大尺寸药柱对工艺适应性、安全性、质量稳定性等技术要求。

#### 参 考 文 献

[1] 李权,王福德,王国庆,等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. 航空制造技术, 2018,61(3): 74-82,89.

LI Q, WANG F D, WANG G Q, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(3): 74-82,89.

[2] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.

ZHANG X W. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-16.

[3] 周长平,林枫,杨浩,等. 增材制造技术在船舶制造领域的应用进展[J]. 船舶工程, 2017,39(2):80-87.

ZHOU C P, LIN F, YANG H, et al. Application Progress of additive manufacturing technology in shipbuilding field[J]. Ship Engineering, 2017,39(2):80-87.

[4] 张洪宝,胡大超. 增材制造技术的应用及发展[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2016, 16(1): 93-98.

ZHANG H B, HU D C. Application and development of additional material manufacturing technology[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology ( Natural Science ),

- 2016, 16(1):93-98.
- [5] ZUNINO III J L, SCHMIDT D P, PETROCK A M, et al. Inkjet printed devices for armament applications[J]. Tech Connect Briefs, 2010, 2:542-545.
- [6] IHNEN A C, LEE W, FUCHS B, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials for direct writing[C]//54th Fuze Conference. Kansas City, MO, US, 2010.
- [7] SURAPANENI R, DAMAVARAPU R. Process improvements in CL-20 manufacture[C]//31th International Annual Conference of ICT on Energetic Materials. Karlsruhe, Germany: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2000:108.
- [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] 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.
- [10] IHNEN A C, LEE W Y, FUCHS B, et al. Ink jet printing and patterning of explosive materials: US 9296241 B1[P]. 2016-03-29.
- [11] WALTERS I T, GROVEN L J. Environmentally friendly boron-based pyrotechnic delays: an additive manufacturing approach[J]. ACS Sustainable Chemistry Engineering, 2019, 7(4):4360-4367.
- [12] RUZ-NUGLO F D, GROVEN L J. 3-D printing and development of fluoropolymer based reactive inks[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 20(2):1700390.
- [13] 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 Y L, WU L Z, TANG Y, et al. Direct writing rule of nano CL-20 explosive ink[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1):39-42.
- [14] 宋长坤, 安崇伟, 叶宝云, 等. 粒度对 CL-20 基炸药油墨临界传爆特性的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(12):1014-1018.
- SONG C K, AN C W, YE B Y, et al. Influence of particle size on critical detonation performance of CL-20 explosives ink[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(12):1014-1018.
- [15] 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 Q B, AN C W, XU C H, et al. Design of viton/PVA binder emulsion and its application in explosives ink[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(1):60-67.
- [16] 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 Z Q, CHEN J, QIAO Z Q, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2):235-238.
- [17] 于江, 杨振英, 安琪. 油墨炸药的粒度对其传爆性能的影响[J]. 含能材料, 2005, 13(3):155-157.
- YU J, YANG Z Y, AN T. Effects of the particle size of ink explosive on the explosion transfer performance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(3):155-157.
- [18] 常红娟, 于江, 李蓉. 油墨炸药质量控制研究[J]. 火工品, 2009(2):20-23.
- CHANG H J, YU J, LI R. Research on controlling the quality of ink explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009(2):20-23.
- [19] 韩瑞山, 张蕊, 张方, 等. 溶剂对微控直写含能油墨的性能影响[J]. 火工品, 2017(1):18-21.
- HAN R S, ZHANG R, ZHANG F, et al. Influences of solvent on the properties of explosive inks for micro-controlled direct writing[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(1):18-21.
- [20] ZHANG L, ZHANG F, WANG Y L, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1209(2019):12-16.
- [21] 邢宗仁. 含能材料三维打印快速成形技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- XING Z R. Research of three-dimensional printing for energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [22] 徐传豪, 安崇伟, 武碧栋, 等. CL-20 基炸药油墨的直写成型及性能研究[J]. 火工品, 2018(1):41-44.
- XU C H, AN C W, WU B D, et al. Performances and direct writing of CL-20 based explosive ink[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(1):41-44.
- [23] JOHNSTON H E, WARDLE R B. Process of crystallizing 2, 4, 6, 8, 10, 12-hexanitro-2, 4, 6, 8, 10, 12-hexaazatetracyclo [5.5.0.0.5, 903, 11] dodecane: US 5874574A[P]. 1999-02-23.
- [24] 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 C K. CL-20-based explosive ink: design and micro-pen direct ink writing[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [25] 李千兵. 乳液型粘结体系/CL-20 基炸药油墨的设计



- 及应用基础研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
- LI Q B. Study on the design and basic application of emulsion binder system/CL-20 based explosive ink[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [26] 徐传豪,安崇伟,王晶禹,等. 表面活性剂的 HLB 值对 HMX/聚氨酯基炸药油墨流变性能的影响[J]. 含能材料, 2017,25(9): 745-749.
- XU C H, AN C W, WANG J Y, et al. Effect of HLB numbers of surfactants on the rheological property of HMX/polyurethane based explosive ink[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017,25(9): 745-749.
- [27] 王景龙. 3DP 炸药油墨配方设计及制备技术[D]. 太原:中北大学, 2015.
- WANG J L. 3DP explosive ink formulation and preparation technology[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [28] 张晓婷. 用于喷墨打印快速成形技术的纳米铝热剂含能油墨研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- ZHANG X T. Study on energetic ink of nano-thermites for inkjet print rapid prototyping technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
- [29] PIQUÉ A, CHRISET D B. Direct-write technologies for rapid prototyping applications[M]. San Diego, CA, US: Academic Press, 2002.
- [30] 彭翠枝. 含能材料增材制造技术:新兴的精密高效安全制备技术[J]. 含能材料, 2019,27(6): 445-447.
- PENG C Z. Additive manufacturing for energetic materials: emerging precision loading & efficient and safe preparation technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019,27(6): 445-447.
- [31] CHIROLI M, CISZEK F, BASCHUNG B. Additive manufacturing of energetic material[C]//Proceedings of the 29th Annual International Solid Freedom Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference. Austin, TX, USA, 2018.
- [32] MURRAY A K, ISIK T, ORTALAN V, et al. Two-component additive manufacturing of nanothermite structures via reactive inkjet printing[J]. Journal of Applied Physics, 2017,122: 184901.
- [33] 转管炮. 炸药也能 3D 打印? 英国人这回真牛了, 个性化定制炸药, 还特省钱! [EB/OL]. [2020-03-18]. <http://xw.qq.com/cmsid/20200318A0GZM800.html>.
- [34] 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 L, WANG Q H, LI W H, et al. Preparation and performances of nano-HMX and TNT melt-cast explosives based on 3D printing technology[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1291-1298.
- [35] 方健,胡桥,刘玥,等. PBX 型炸药 3D 打印喷射理论与仿真分析[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 140-145.
- FANG J, HU Q, LIU Y, et al. 3D printing injection theory and simulation analysis of PBX explosive[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 140-145.
- [36] 黄璠,王军,毛耀峰,等. TATB/CL-20 复合装药结构的 3D 打印成型技术[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 931-935.
- HUANG J, WANG J, MAO Y F, et al. Preparation of CL-20/TATB composite charge structure by 3D printing technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019,27(11): 931-935.
- [37] 张亮,刘晶,张哲,等. 增材制造技术以及在火炸药研究中的现状与发展[J]. 爆破器材, 2016,45(4): 1-8.
- ZHANG L, LIU J, ZHANG Z, et al. Additive manufacturing technology and its research status and development in propellant and explosive industry[J]. Explosive Materials, 2016,45(4): 1-8.
- [38] 蔺向阳,屈明和,曹宇鹏,等. 一种基于紫外光固化的固体推进剂 3D 打印成型方法:CN 107283826A[P]. 2017-10-24.
- [39] 蔺向阳,曹宇鹏. 一种固体推进剂增材制造系统及外表面旋转成型方法:CN 106863801A[P]. 2017-06-20.
- [40] BROUSSEAU P, AMPLEMAN G, THIBOUTOT S, et al. High performance melt-cast plastic-bonded explosives[C]// 2006 Insensitive Munition & Energetic Materials Technology Symposium. Bristol, UK; Defence Research and Development Canada, 2006: 24-28.
- [41] CUMMING A S. Collaboration on pressable explosives for shaped charges: a European success story[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999, 24(1): 46-49.
- [42] 孙建. 等静压炸药装药技术发展与应用[J]. 含能材料, 2012,20(5): 638-642.
- SUN J. Development of isostatic pressing technology of explosive charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012,20(5): 638-642.
- [43] 黄亚峰,王晓峰,王红星,等. 火炸药双螺杆挤出工艺的研究现状与发展[J]. 爆破器材, 2013,42(4): 41-44.
- HUANG Y F, WANG X F, WANG H X, et al. Research status and development of the twin screw extrusion technology on the propellants and explosives[J]. Explosive Materials, 2013,42(4): 41-44.